

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
ENGENHARIA AMBIENTAL

PÂMELA CASTILHO DIAS

**Análise de viabilidade da utilização do biogás gerado na digestão  
anaeróbia de levedura residual de cervejaria para geração de energia**

São Carlos – SP

2014

PÂMELA CASTILHO DIAS

**Análise de viabilidade da utilização do biogás gerado na digestão anaeróbia de levedura residual de cervejaria para geração de energia**

Trabalho de Graduação apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo (USP) como parte dos requisitos para obtenção do título de Graduada em Engenharia Ambiental.

Orientador:

Dr. Moacir Messias de Araujo Junior

São Carlos – SP

2014

# FOLHA DE JULGAMENTO

---

Candidato(a): **Pamela Castilho Dias**

Data da Defesa: 29/10/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

**Moacir Messias de Araujo Junior (Orientador(a))**

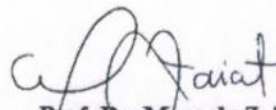
Aprovada

**Márcia Helena Rissato Zamariolli Damianovic**

Aprovada

**Eugenio Foresti**

Aprovada

  
Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

*Aos meus pais, Marcio e Inez,  
pelo apoio e esforço para que  
eu realizasse um sonho.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e pela graça de conhecer pessoas tão especiais.

Ao Dr. Moacir Messias de Araujo Junior pela orientação deste trabalho, pelos ensinamentos transmitidos e pela confiança e paciência a mim dedicados.

Aos meus co-orientadores, Theo Syrto Octavio de Souza, Fernando Fdz-Polanco e Catarina Ferreira, pelo tempo disponibilizado, conhecimento transmitido e suporte.

Aos meus pais, Marcio Veloso Dias e Maria Inez Castilho Dias, pelo exemplo de conduta, apoio incondicional e incentivo em todas as etapas de minha vida.

Às minhas irmãs Samantha Castilho Dias e Camila Castilho Dias e ao meu sobrinho Miguel Antônio Castilho Martins por alegrarem ainda mais meus dias.

Às minhas amigas Tarine Camargo Caires de Lima e Patrícia Bissoli Ortiz, por todos estes anos de amizade, pela compreensão, pelo apoio e pelas conversas.

Ao meu namorado Thiago Gaspar Nelo pelo carinho, companheirismo, apoio, incentivo e paciência em todas as horas.

Aos meus queridos amigos de sala, a eterna 09, por tornarem cada ano da graduação mais gratificante. Em especial, à minha segunda família, Érica Kamimura Nishimura, Miriam Harumi Koyama, Amanda Franzoni Marques, Lucas Augusto dos Reis Beco, Túlio Queijo de Lima, Rafael Yoshio Tiba, Eduardo Mayer, Aline Marcon Botasso, Aline de Borgia Jardim e Thais Zaninetti Macedo, pela amizade sem limites, pelas risadas, lágrimas, abraços e histórias compartilhadas.

Aos meus companheiros e amigos de EESC jr., pelos conhecimentos divididos e por abrirem novos horizontes em minha vida. Em especial, ao grupo de eventos e a diretoria 2011.

A todos que me fizeram sentir em casa, mesmo a quilômetros de distância de meu país, pela recepção, amizade e experiências compartilhadas. Em especial, a María Pinilla, Juan Carlos López Neila, Iiro Lehtinen, Octavio Do Sauced, Raul Muñoz, Govantes Quijano, Raquel Lebrero, Silvia Arranz Martin, Vir Vega e Raul Cano.

Aos professores da Engenharia Ambiental, pelos conhecimentos construídos e transmitidos e pela contribuição em minha formação como pessoa e profissional.

À FAPESP pelo incentivo à pesquisa realizada.

Por fim, a todos que de uma forma ou de outra fizeram parte desta etapa de minha vida e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

*Se as coisas são inatingíveis... ora!  
Não é motivo para não querê-las...  
Que triste os caminhos se não fora  
A presença distante das estrelas!*

*Mario Quintana*

## RESUMO

DIAS, P. C. (2014) **Análise de viabilidade da utilização do biogás gerado na digestão anaeróbia de levedura residual de cervejaria para geração de energia**. 90 p. Trabalho de Graduação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

O excesso de levedura proveniente da etapa de fermentação na produção de cerveja é um dos subprodutos mais gerados nas cervejarias. Devido a grande quantidade de matéria orgânica presente na levedura residual e ao crescente interesse pela geração de energia através de biomassa, a digestão anaeróbia visando à geração de biogás torna-se uma alternativa atrativa para este resíduo. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade da produção de energia através do biogás gerado na degradação anaeróbia de levedura residual de cervejaria. O estudo se dividiu em duas etapas, a primeira experimental e a segunda de análise de viabilidade econômica. Na etapa experimental avaliou-se a degradação anaeróbia da levedura residual do processo de fermentação da cerveja. Foram analisadas três relações substrato/inóculo, sendo elas 0,25 gSV/gSV, 0,50 gSV/gSV e 0,75 gSV, gSV. O ensaio foi realizado em batelada por 30 dias em um shaker, sob agitação de 150 rpm, mantido em câmara climatizada à 35°C. Avaliou-se o desempenho do processo na produção de metano, na degradação de sólidos voláteis e na redução de DQO. A condição que obteve os melhores resultados na produção de biogás foi a de 0,50 gSV/gSV. Para esta condição foram testados dois tipos de pré-tratamentos, térmico e ultrassônico, os quais foram aplicados para levedura em sua forma natural e em suas fases líquida e sólida. Os resultados obtidos mostraram que a levedura residual possui alta biodegradabilidade, alcançando no primeiro ensaio 92,5% de degradação, sem a aplicação de pré-tratamento, evidenciando que os pré-tratamentos não produziram melhorias significantes na produção de biogás e de metano. Na etapa de análise econômica estimou-se o retorno financeiro dos sistemas de cogeração de energia e de produção de energia térmica através de combustão na caldeira, comparando os resultados obtidos com o “crédito” obtido na comercialização da levedura residual para a produção de ração animal. Os resultados mostraram que ambos os sistemas apresentam retornos financeiros melhores que o da utilização da ração para produção de ração animal, sendo que os retornos por volume de cerveja produzida foram: R\$0,39/hL no sistema de cogeração de energia, R\$ 0,27/hL no sistema de geração de energia térmica na caldeira e R\$ 0,10/hL na utilização da levedura para a produção de ração animal.

Palavras chave: Biogás; Cervejaria; Cogeração; Digestão anaeróbia; Levedura.

## ABSTRACT

DIAS, P. C. (2014) **Feasibility analysis of the usage of the biogas generated in the anaerobic digestion of brewery surplus yeast to energy generation**. 90 p. Trabalho de Graduação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

The surplus yeast from the fermentation step in beer production is one of the most generated byproducts in breweries. Due to the large amount of organic matter present in the surplus yeast and to the growing interest in the generation of bioenergy, anaerobic digestion becomes an attractive alternative for this residue in order to generate biogas. Thus, this study aimed to conduct a feasibility analysis of energy production through the biogas generated in the anaerobic digestion of brewery surplus yeast. The study was divided into two stages, the first one was experimental and in the second one an analysis of the economic feasibility was conducted. In the experimental step the anaerobic digestion of surplus yeast from fermentation process of beer was carried out. Three substrate/inoculum ratio were analyzed: 0,25 gVS/gVS, 0,50 0,25 gVS/gVS e 0,75 0,25 gVS/gVS. The experiments were conducted in batch mode, for 30 days, in a temperature-controlled chamber at 35 ° C and under agitation on a shaker. The performance of the process was evaluated in the methane production, the volatile solids degradation and the COD reduction was evaluated. The condition that achieved the best results in biogas production was 0,50 gVS/gVS. For this condition two types of pretreatment were tested, thermal and ultrasonic, which were applied to yeast in its natural form and in its liquid and solid phases. Results showed that surplus yeast presents a high biodegradability, reaching 92.5% of degradation in the first test without pretreatment, showing that pretreatments did not produce any significant improvement on biogas and methane yield. The economic analysis step estimated the payback of energy cogeneration and thermal energy production through combustion in boiler systems, comparing the obtained results to the “credit” achieved with the sale of surplus yeast for the production of animal feed. The results showed that both systems present better financial returns than the ones obtained by the application of surplus yeast to the animal feed production. The financial returns obtained per hL of produced beer was: R\$0,39/hL in the cogeneration system, R\$ 0,27/hL in the thermal energy generation system and R\$ 0,10/hL in the use of surplus yeast to the production of animal feed.

Keywords: Anaerobic digestion. Biogas. Brewery. Cogeneration. Yeast.



**LISTA DE FIGURAS**

Figura 3.1 – Principais Etapas do Processo Produtivo da Cerveja e Resíduos Gerados ..	5
Figura 3.2 – Fases da Digestão Anaeróbia .....	13
Figura 3.3 – Curva típica do crescimento bacteriano .....	17
Figura 3.4 – Digestor anaeróbio de baixa carga .....	20
Figura 3.5 – Digestor anaeróbio de único estágio e alta carga .....	20
Figura 3.6 – Digestor anaeróbio de dois estágios e alta carga.....	21
Figura 3.7 – Processo de utilização da levedura residual como ração animal.....	30
Figura 4.1 – Fluxograma das Etapas Experimentais 2 e 3.....	33
Figura 5.1 – Etapa 1: Produção e Produtividade de biogás. ....	44
Figura 5.2 – Etapa 1: Produção e Produtividade de metano.....	45
Figura 5.3 – Etapa1: Composição do biogás com relação ao metano .....	46
Figura 5.4 – Etapa 3: Produção e Produtividade de biogás .....	50
Figura 5.5 – Etapa 3: Produção e Produtividade de metano.....	51
Figura 5.6 – Etapa 3: Composição do biogás com relação ao metano .....	55
Figura 5.7 – Etapa 3: Curvas do Modelo Cinético de Primeira Ordem.....	57
Figura 5.8 – Sistemas de aproveitamento da levedura residual de cervejaria abordadas no estudo caso.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Caracterização dos principais resíduos gerados no processo de produção da cerveja.....	9
Tabela 3.2 – Características quantitativas dos resíduos gerados no processo de produção da cerveja.....	10
Tabela 3.3 – Carga orgânica potencial de cada etapa do processo produtivo de cerveja	10
Tabela 3.4 – Principais componentes do biogás gerado em digestores anaeróbios .....	16
Tabela 3.5 – Parâmetros de projeto para dimensionamento de digestores anaeróbios...	22
Tabela 3.6 – Poder calorífico de alguns gases usados como combustível .....	23
Tabela 3.7 – Eficiência das principais tecnologias para geração de energia elétrica utilizando biogás.....	24
Tabela 3.8 – Características de sistemas de aproveitamento do biogás para geração de energia .....	26
Tabela 3.9 – Composição centesimal da levedura residual de cervejaria .....	28
Tabela 3.10 – Macro e micronutrientes presentes na levedura residual de cerveja.....	28
Tabela 4.1 – Condições aplicadas na terceira etapa experimental .....	32
Tabela 4.2 – Composição dos macro e micronutrientes adicionados ao inóculo .....	38
Tabela 4.3 – Métodos analíticos utilizados .....	40
Tabela 5.1 – Biodegradabilidades obtidas nas condições aplicadas na Etapa 1 .....	46
Tabela 5.2 – Etapa 2: Caracterização dos substratos antes e após pré-tratamentos .....	48
Tabela 5.3 – Etapa 3: Produção e Produtividade de Biogás e de Metano .....	54
Tabela 5.4 – Biodegradabilidades obtidas nas condições aplicadas na Etapa 3.....	55
Tabela 5.5 – Etapa 3: Parâmetros Cinéticos .....	58
Tabela 5.6 – Etapa 3: Remoção de DQO, ST, SV e NTK.....	59
Tabela 5.7 – Síntese dos resultados obtidos na etapa experimental .....	61
Tabela 5.8 – Economia obtida no sistema de cogeração de energia.....	74
Tabela 5.9 – Potencial economia dos sistemas de geração de energia com relação ao gastos no consumo de energia na cervejaria.....	76
Tabela 5.10 – Receita, custos e lucro da produção de levedura para ração animal.....	79
Tabela 5.11 – Comparação econômica das alternativas estudadas .....	80

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>IV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
3.1. PROCESSO PRODUTIVO DA CERVEJA E RESÍDUOS GERADOS.....	5
3.2. PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	11
3.3. CINÉTICA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	16
3.4. DIGESTORES ANAERÓBIOS .....	18
3.5. GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS .....	22
3.5.1. <i>Aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica</i> .....	23
3.5.2. <i>Aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica</i> .....	25
3.5.3. <i>Aproveitamento do biogás para geração de energia mecânica</i> .....	25
3.5.4. <i>Estudo de aproveitamento do biogás</i> .....	26
3.6. UTILIZAÇÃO DA LEVEDURA RESIDUAL COMO RAÇÃO ANIMAL .....	26
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
4.1. ETAPA EXPERIMENTAL .....	31
4.1.1. <i>Substrato</i> .....	34
4.1.2. <i>Inóculo</i> .....	34
4.1.3. <i>Biodigestores</i> .....	35
4.1.4. <i>Pré-tratamentos</i> .....	35
4.1.5. <i>Montagem do ensaio</i> .....	36
4.1.6. <i>Métodos Analíticos</i> .....	38
4.1.7. <i>Obtenção dos parâmetros cinéticos</i> .....	40
4.2. ESTUDO DE CASO.....	41
4.2.1. <i>Concepção do sistema</i> .....	41
4.2.2. <i>Dimensionamento do sistema</i> .....	42
4.2.3. <i>Análise de viabilidade do sistema</i> .....	42
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
5.1. ETAPA EXPERIMENTAL .....	44
5.1.1. <i>Etapa 1 – Comparação entre as relações substrato/inóculo (S/I)</i> .....	44

5.1.2. <i>Etapa 2 – Efeitos dos pré-tratamentos na composição dos substratos</i> .....	47
5.1.3. <i>Etapa 3 – Efeitos dos pré-tratamentos e da separação de fases na produção de biogás</i> .....	49
5.2. ESTUDO DE CASO.....	62
5.2.1. <i>Concepção do sistema</i> .....	62
5.2.2. <i>Dimensionamento do sistema</i> .....	64
5.2.3. <i>Análise de viabilidade do sistema</i> .....	72
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>81</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>84</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A cerveja é um dos principais produtos que compõem o setor de bebidas, possuindo um mercado consumidor fiel e crescente em diversos países (ROSA *et al.*, 2006). O Brasil, segundo dados do Sindicato Nacional da Cerveja (SINDICERVE), é o nono consumidor per capita de cerveja e o quinto país que mais a produz, consumindo cerca de 47,6 litros por habitante por ano e produzindo 8,5 bilhões de litros por ano. Devido a grande produção da bebida, as cervejarias produzem grandes volumes de efluente, sendo gerado em média de 3 a 10 litros de efluente para cada litro de cerveja produzido (BRAEKEN *et al.*, 2004; FILLAUDEAU *et al.*, 2006; KANAGACHANDRAN *et al.*, 2006).

No processo de produção da cerveja, além da água residuária, são gerados alguns resíduos sólidos, como cascas e polpas de grãos, bagaço de malte, trub e excesso de levedura (SANTOS E RIBEIRO, 2005). A levedura residual do processo de produção da cerveja é o segundo subproduto mais gerado em cervejarias, atrás somente dos resíduos de grãos (FERREIRA *et al.*, 2010), e possui uma carga poluidora potencial de 3,71 kg DBO/m<sup>3</sup> de cerveja produzida, que corresponde a 30% da carga poluidora do processo (SANTOS E RIBEIRO, 2005). Este subproduto é gerado durante o processo de fermentação, no qual as leveduras se reproduzem, obtendo-se ao final mais levedo do que será utilizado na próxima batelada, tornando necessário o descarte de uma parcela desse material.

A produção de levedura residual depende do tipo que cerveja produzida, pois cada cerveja demanda um período e tipo de fermentação. Usualmente, na fermentação de cervejas tipo lager, que são as mais produzidas no mundo, gera-se cerca de 1,7 a 2,3 kg de levedura residual por metro cúbico de cerveja produzida (HUIGE, 2006 *apud* FERREIRA *et al.*, 2010). Genericamente, segundo SANTOS E RIBEIRO (2005), em uma planta que produz 170.000 hL de cerveja por mês são gerados de 2 a 4 kg de levedura residual por hectolitro de cerveja produzido.

Este subproduto pode ser utilizado como matéria-prima para diferentes aplicações. Dentre estas se encontram a utilização como ração animal, a aplicação em processos biotecnológicos, como processos fermentativos para a produção de etanol e outros compostos de valor agregado, a utilização como substrato para cultivo de microrganismos e a sua aplicação para a extração de compostos que podem ser utilizados como matéria-prima para outros processos (FERREIRA *et al.*, 2010).

Os produtos derivados da levedura residual possuem elevado teor de proteína (30% a 70%), são ricos em vitaminas do complexo B (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>6</sub>, ácido pantotênico, niacina, ácido fólico e biotina), em minerais, em macro e microelementos, particularmente selênio e fibra dietética (YAMADA *et al.*, 2003). Entretanto, embora existam diferentes potenciais aplicações para a levedura residual, atualmente, este subproduto é mais utilizado como ração animal para suínos e ruminantes, devido as suas boas características nutricionais, porém esta é uma aplicação pouco valorizada economicamente (FERREIRA *et al.*, 2010).

Para que a levedura residual de cervejaria possa ser utilizada como ração animal é necessário realizar um processo de secagem. Um estudo realizado por ZUNPANČIČ *et al.* (2009) mostrou que este processo de secagem demanda muita energia, e por isso está tornando-se economicamente insustentável. Neste sentido, considerando a grande quantidade de matéria orgânica presente nas leveduras residuais e o aumento do interesse pela geração de bioenergia, a digestão anaeróbia visando à geração de biogás torna-se uma alternativa atrativa para este tipo de resíduo (NEIRA E JEISON, 2010).

A digestão anaeróbia é um processo microbiano de flora mista, no qual há uma grande interdependência entre os microrganismos que participam dos diferentes estágios de degradação. As principais etapas envolvidas no processo são a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese. Quando o substrato a ser digerido possui uma grande quantidade de sólidos, a hidrólise pode se tornar uma etapa limitante (SPEECE, 2008), pois nela ocorre a conversão de matéria orgânica insolúvel e macromoléculas em substâncias orgânicas solúveis menos complexas, as quais podem ser assimiladas pelas comunidades bacterianas das outras etapas.

Diferentes pré-tratamentos vem sendo aplicados, visando proporcionar a desintegração dos sólidos, acelerando a etapa de hidrólise (NEIRA E JEISON, 2010). Para os lodos gerados em tratamentos de águas residuárias municipais, os métodos de pré-tratamentos mais aplicados a nível comercial são térmico, ultrassônico e microondas (DONOSO-BRAVO *et al.*, 2010). Já os métodos de pré-tratamento mais aplicados para resíduos da indústria alimentícia são: térmico, químico e ultrassônico (CARLSSON *et al.*, 2012).

Neste contexto, este trabalho teve como principal objetivo analisar a viabilidade da aplicação da levedura residual como substrato para a geração de energia através da digestão anaeróbia. Para isso dividiu-se o trabalho em duas etapas, uma experimental e uma de análise de viabilidade econômica. Na etapa experimental o objetivo foi avaliar o

potencial de produção de biogás da levedura residual do processo de produção de cerveja e de suas fases sólida e líquida, além de verificar os efeitos dos pré-tratamentos térmico e ultrassônico na digestão anaeróbia dos substratos, visando conhecer a melhor condição para a produção de biogás. Na segunda etapa o objetivo foi analisar a viabilidade da geração de energia através da digestão anaeróbia, realizando um estudo de caso e comparando os resultados obtidos com a aplicação da levedura residual na produção de ração animal.

## 2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade da levedura residual do processo de produção de cerveja na geração de energia através da digestão anaeróbia. Para realizar esta análise, dividiu-se o trabalho em duas etapas, a primeira consistiu em um experimento em escala laboratorial e a outra em um estudo de viabilidade econômica do processo proposto.

Na etapa experimental os objetivos foram avaliar a biodegradabilidade e o potencial de produção de biogás e de metano gerados na digestão anaeróbia de levedura residual do processo de fermentação da cerveja. Avaliaram-se as características deste processo aplicado ao substrato em sua forma natural e em suas fases líquida e sólida. Em adição, também se objetivou analisar os efeitos dos pré-tratamentos térmico e ultrassônico ao substrato em sua forma natural e em sua fase sólida.

Na etapa de estudo de viabilidade econômica objetivou-se analisar os custos, benefícios e problemas relacionados ao processo proposto, comparando-o com a aplicação da levedura residual na produção de ração animal.

Deste modo, foram objetivos específicos do projeto:

- I. Definir a melhor relação substrato/inóculo para a digestão anaeróbia do resíduo;
- II. Avaliar o efeito dos pré-tratamentos na estrutura microbiológica e nas características físico-químicas dos substratos;
- III. Avaliar o desempenho do processo na produção de biogás, degradação de sólidos voláteis e redução da DQO final;
- IV. Estimar os parâmetros cinéticos envolvidos na produção de metano;
- V. Comparar o desempenho geral dos substratos e dos pré-tratamentos aplicados, definindo qual a melhor condição;
- VI. Estimar os custos da geração de energia através da digestão anaeróbia;
- VII. Analisar a viabilidade econômica da geração de energia através da digestão anaeróbia, comparando com o processo de produção de ração utilizando levedura residual do processo de produção de cerveja.

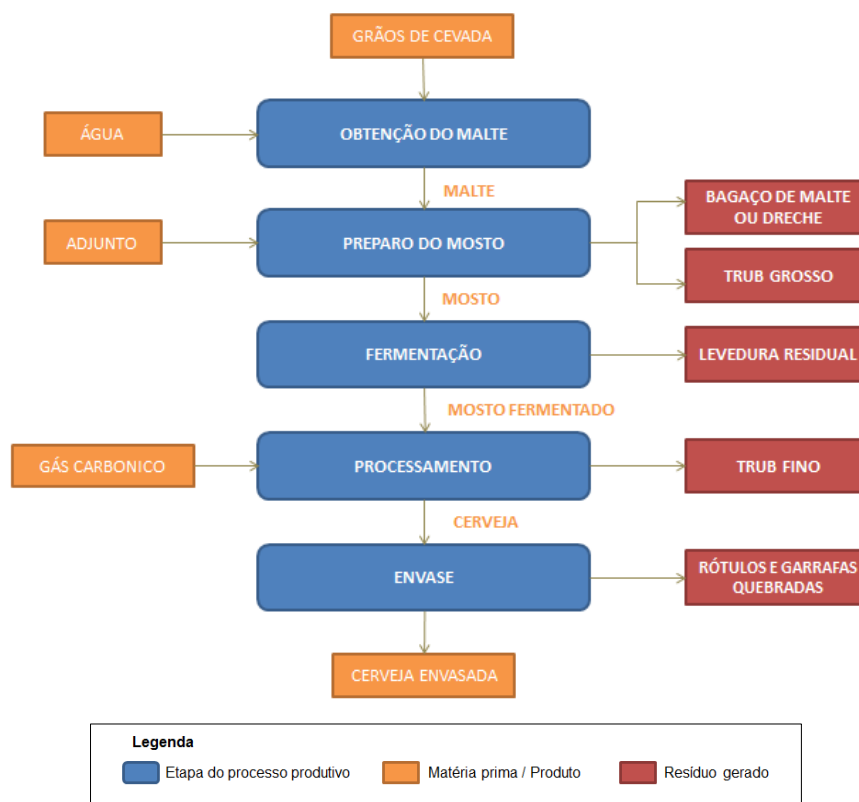


### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Processo produtivo da cerveja e resíduos gerados

A fabricação da cerveja é realizada através de um processo de fermentação alcoólica que envolve vários estágios de produção e utiliza diversas matérias primas. O malte de cevada é o principal ingrediente, outros componentes são grãos de aveia, xarope de milho, arroz, lúpulo, levedura e água, sendo que esta corresponde de 90 a 92 % da composição da cerveja (ROSA *et al.*, 2006).

A fermentação é a principal etapa do processo, antes desta são realizadas etapas para o preparo da matéria prima, visando garantir a efetividade da fermentação. Após a etapa principal são realizadas as etapas de tratamento da cerveja, que visam conferir as características organolépticas desejadas no produto final (SANTOS E RIBEIRO, 2005). Um esquema com as principais etapas do processo produtivo e os resíduos gerados em cada etapa é apresentado na Figura 3.1.



**Figura 3.1 – Principais Etapas do Processo Produtivo da Cerveja e Resíduos Gerados**

Fonte: Adaptado de SANTOS E RIBEIRO (2005)

A seguir é apresentada uma descrição simplificada, segundo SANTOS E RIBEIRO (2005), de cada uma das etapas presentes na Figura 3.1

#### Obtenção do malte:

Esta etapa consiste no processo de preparação do grão de cevada para obtenção do malte. É dividida em limpeza e seleção dos grãos, embebição da cevada, germinação e secagem. A limpeza e seleção dos grãos consiste na separação de sólidos grosseiros e na divisão dos grãos de acordo com seu tamanho, para a obtenção de um malte homogêneo. A embebição da cevada em água é realizada para tirar o grão de cevada de seu estado de latência, propiciando sua germinação. A germinação dura de 4 a 5 dias e é realizada em estufa climatizada. A cevada germinada é enviada para fornos de secagem, a fim de interromper o processo de germinação. Posteriormente, ainda nos fornos de secagem é realizada a caramelização dos grãos, transformando-os em malte. No Brasil é mais comum obter o malte em uma maltaria externa.

- Preparação do mosto:

A preparação do mosto consiste na obtenção de uma solução aquosa de açúcares, que é obtida através da conversão do amido do malte em açúcares menores, a qual é utilizada como substrato para as bactérias responsáveis pela fermentação. Esta etapa se divide em moagem do malte, maceração do malte e adjunto, filtração do mosto, fervura do mosto, clarificação e resfriamento do mosto.

A moagem do malte é um processo físico que visa romper a casca dos grãos e proporcionar o acesso ao amido do grão maltado. A maceração é um processo de preparação química do malte que visa a solubilização do amido e das proteínas presentes no malte. Neste processo, mistura-se os grãos de malte moídos à água aquecida, visando ativar a ação de enzimas presentes nos grãos. Os adjuntos são outros produtos utilizados como fonte adicional de açúcar. Estes, para serem macerados, necessitam ser aquecidos em caldeira própria e posteriormente misturados ao malte em maceração. A maceração do malte e do adjunto dá origem ao mosto, uma solução de açúcares proveniente da quebra do amido presente no malte e nos adjuntos.

Após o preparo do mosto, este é resfriado e filtrado, para a remoção de resíduos de grãos de malte e adjuntos. O material retido no filtro, que utiliza como meio filtrante as próprias cascas de malte presentes no mosto, é denominado *bagaço de malte* ou *dreche*. Em seguida, é realizada a fervura do mosto, etapa que inativa as enzimas,

coagula e precipita as proteínas, além de concentrar e esterilizar o mosto. Nesta etapa também é realizada a adição de aditivos, como lúpulo, caramelo, açúcar, mel e extratos vegetais, que proporcionam diferentes características organolépticas à cerveja. Depois da fervura do mosto é realizada a clarificação, etapa que visa reter partículas remanescentes no mosto que possam comprometer a fermentação. Esta etapa é efetuada, em geral, através de um processo de decantação hidrodinâmica realizada em um equipamento denominado *whirlpool*. Os resíduos provenientes desta etapa são chamados de *trub grosso*. Por último, antes da fermentação, o mosto clarificado é resfriado em um trocador de calor.

- Fermentação:

A fermentação do mosto se divide em duas fases, uma aeróbia e uma anaeróbia. Na fase aeróbia as leveduras se reproduzem, chegando a aumentar de 2 a 6 vezes, e na fase anaeróbia ocorre a fermentação propriamente dita, na qual ocorre a conversão dos açúcares do mosto em gás carbônico e álcool. Ao final desta etapa obtém-se, além do mosto fermentado, um excesso de levedura. Este excesso de levedura geralmente é recuperado por sedimentação natural. Uma parte desta levedura é tratada para ser reutilizada e outra parte é descartada e/ou vendida para indústrias de alimentos.

- Processamento:

O processamento do mosto fermentado é a etapa de refinamento das características da cerveja, na qual ocorrem processos que visam gaseificar, garantir a qualidade da cerveja e conferir características organolépticas adicionais. Os processos que compõem o processamento são: maturação, filtração e carbonatação.

Na maturação ocorre a separação dos levedos de cerveja e, em adição, ocorrem algumas reações químicas que promovem a estabilização do produto final. A filtração é realizada para promover a remoção de impurezas não decantadas e a limpidez do produto final. O resíduo gerado nesta etapa, a torta de filtração, possui alto teor de nitrogênio e é denominado *trub fino*. Por último, procede-se a carbonatação, processo no qual ocorre a injeção de gás carbônico produzido na fermentação e, eventualmente, de gás nitrogênio, com o intuito de favorecer a formação de espuma.

- Envase:

O envase é a etapa final do processo de produção da cerveja e é composto pelos processos de lavagem de garrafas, envase, pasteurização e expedição.

A lavagem de garrafas é realizada nos casos de envase em garrafas de cerveja retornáveis. No processo de limpeza são utilizados solução alcalina (soda) e detergente, sendo aplicado para o enxágue e desinfecção, água quente. Neste etapa ocorre um grande consumo de água e energia e também a geração de uma grande quantidade de resíduos, dentre os quais estão pasta celulósica, vidros quebrados e efluente líquido da lavagem.

Na etapa de envase a cerveja fermentada é encaminhada à máquinas, nas quais a cerveja é envasada em garrafas de vidro, latas de alumínio ou barris. Neste processo são gerados efluentes provenientes de derramamentos de cerveja e resíduos sólidos, tais como, garrafas quebradas e latas amassadas. Após o envase, ocorre a etapa de pasteurização, na qual objetiva-se aumentar a estabilidade e durabilidade da cerveja, através da eliminação de microorganismo. Nesta, submete-se a cerveja envasada a um processo de aquecimento de até 60°C seguido de um rápido resfriamento de até 4°C. Por fim, procede-se a etapa de expedição, na qual realiza-se a rotulagem das garrafas e a preparação para o transporte.

Analisando o processo produtivo da cerveja, observa-se que ocorre a geração de diversos resíduos sólidos e efluentes líquidos nas diferentes etapas de produção. Dentre estes encontram-se o bagaço de malte, o trub grosso, a levedura residual, o trub fino, os resíduos de cerveja e a água de lavagem.

A geração de efluentes líquidos varia bastante com relação ao volume e características. Tem-se, por exemplo, que a lavagem de equipamentos gera enormes volumes de efluentes, entretanto, estes possuem reduzida carga orgânica. Já a fermentação e filtragem geram apenas 3% do volume de efluentes, mas estes efluentes são responsáveis por 97% da carga orgânica total (ENVIRONMENT CANADÁ, 1997).

Os resíduos sólidos apresentam diferentes características, dependendo da etapa no qual são gerados. Os principais resíduos gerados, assim como sua fonte, destinação e problemas são apresentados no Tabela 3.1. As características quantitativas da geração de resíduos são apresentadas no Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Caracterização dos principais resíduos gerados no processo de produção da cerveja

<b>Resíduo Gerado</b>	<b>Origem</b>	<b>Utilização</b>	<b>Destinação</b>	<b>Dificuldades</b>
<b>Água residuária</b>	Todas as etapas do processo produtivo	Limpeza, aquecimento e resfriamento de equipamentos	Descarga efluente	Composição química variável
<b>Grãos residuais</b>	Obtenção do Malte	Fonte de açúcar para a fermentação	Agricultura	Higiene, odor e alta DBO
<b>Lúpulo residual</b>	Clarificação do mosto	Adição de características organolépticas	Agricultura	Sabor desagradável para a alimentação animal
<b>Trub Grosso</b>	Clarificação do mosto	-	Descarga efluente	Alta DBO e SST
<b>Trub Fino</b>	Filtração do mosto fermentado	Meio filtrante	Descarga efluente	Alta DBO e SST
<b>Levedura residual</b>	Fermentação	Processo de fermentação	Descarga efluente	Alta DBO e SST
<b>Soda caustica e ácidos</b>	Lavagem de garrafas	Limpeza	Descarga efluente	Acidificação do efluente
<b>Cerveja residual</b>	Envase	Produto final	Descarga efluente	Alta DBO

Fonte: Adaptado de THOMAS & RAHMAN (2006)

Tabela 3.2 – Características quantitativas dos resíduos gerados no processo de produção da cerveja

<b>Resíduo Gerado</b>	<b>THOMAS &amp; RAHMAN (2006)</b>	<b>SANTOS E RIBEIRO (2005)</b>
Água residuária	3 - 10 hL/hL de cerveja produzida	3 - 6 hL/hL de cerveja produzida
Grãos residuais	14 kg/hL de cerveja produzida	-
Bagaço de Malte	-	14 - 20 kg/hL de cerveja produzida*
Lúpulo residual	0,17 kg kg/hL de cerveja produzida	-
Trub	0,35 kg/hL de cerveja produzida	-
Levedura residual	3 kg/hL de cerveja produzida	2 - 4 kg/HL de cerveja produzida*
Cerveja residual	Variável	-

A levedura residual é o segundo sub-produto mais gerado em cervejarias, atrás somente dos resíduos de grãos (FERREIRA *et al.*, 2010). Em adição, este resíduo possui a maior carga poluidora potencial, apresentando 3,71 kg DBO/m<sup>3</sup> de cerveja produzida, o que representa 30 % da carga orgânica poluidora do processo de produção de cerveja (SANTOS E RIBEIRO, 2005), conforme pode ser observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Carga orgânica potencial de cada etapa do processo produtivo de cerveja

<b>Origem</b>	<b>DBO</b>		<b>RNF</b>	
	kg/m <sup>3</sup> cerveja	%	kg/m <sup>3</sup> cerveja	%
<b>Levedura excedente</b>	3,71	30	2,55	30
<b>Trub</b>	3,21	26	1,24	14
<b>Lúpulo</b>	0,39	3	0,77	9
<b>Licor de grãos prensados</b>	0,85	7	0,5	6
<b>Lavagens</b>	2,09	17	0,85	10
<b>Efluente de filtros</b>	0,5	4	1,58	19
<b>Envase</b>	1,2	10	0,66	8
<b>Outros</b>	0,42	3	0,35	4
<b>Total</b>	120,4	100	8,5	100

RNF: Resíduo não filtrável.

Fonte: SANTOS E RIBEIRO (2005)

Neste contexto, considerando a grande quantidade de matéria orgânica presente nas leveduras residuais e o aumento do interesse pela geração de bioenergia, a digestão

anaeróbia visando à geração de biogás torna-se uma alternativa atrativa para este tipo de resíduo (NEIRA E JEISON, 2010).

### 3.2. Processo de digestão anaeróbia

Os sistemas de tratamento aeróbios se apresentaram como uma alternativa atraente durante muito tempo. Entretanto, devido ao elevado consumo de energia para aeração, a viabilidade econômica deste tipo de tratamento se apresentou bastante reduzida para resíduos com elevado conteúdo de material orgânico, resíduos dificilmente biodegradáveis, resíduos que apresentam alta relação carbono-nitrogênio e resíduos com desproporcional relação carbono-fósforo (BUENDÍA *et al.*, 2008). A tecnologia que tem sido amplamente utilizada e vem apresentando boa eficiência para estes tipos de resíduos é a digestão anaeróbia, que resulta na produção de energia renovável a partir da combustão do biogás gerado no processo de tratamento (CUETOS *et al.*, 2008).

A digestão anaeróbia difere bastante do processo aeróbio, especialmente, devido à grande complexidade e interdependência dos microrganismos que participam dos diferentes estágios de degradação. Na digestão aeróbia as bactérias utilizam o oxigênio molecular comoceptor final de elétrons e na digestão anaeróbia os aceptores finais são componentes químicos tais como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) e sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (VARESCHE *et al.*, 2013).

Em ambiente anaeróbio a degradação de matéria orgânica é um processo microbiano de flora mista, que na ausência de oxigênio molecular converte matéria orgânica a compostos gasosos, estes são constituídos predominantemente por metano e dióxido de carbono (MASSEY E POHLAND, 1978). As principais etapas do processo de digestão anaeróbia são:

Hidrólise: etapa na qual a matéria orgânica complexa insolúvel, tal como proteínas, lipídios e carboidratos, é solubilizada e convertida em substâncias menos complexas, formando respectivamente, aminoácidos, ácidos graxos e açúcares solúveis, através da ação de exo-enzimas de bactérias hidrolíticas fermentativas. Os produtos desta fase podem então passar através da parede celular e membranas das bactérias responsáveis pela próxima etapa (acidogênese);

Acidogênese: etapa na qual as bactérias fermentativas acidogênicas utilizam os componentes orgânicos solúveis, incluindo os produtos da hidrólise, metabolizando-os e

convertendo-os em ácidos orgânicos, álcoois, gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), que são posteriormente excretados para fora da célula;

Acetogênese: nesta etapa os produtos do metabolismo das bactérias fermentativas acidogênicas são convertidos em ácido acético, gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) através da ação de bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio e de bactérias homoacetogênicas. A fermentação acidogênica tem um papel importante na conversão de matéria orgânica em energia, na forma de metano, pois o acetato é o principal precursor do metano, portanto, para que a produção de energia venha a ser economicamente viável, a conversão de substrato a acetato deve ser rápida (GHOSH, 1981). Caso essa conversão não ocorra, haverá o acúmulo dos produtos da hidrólise e da fermentação ácida no reator, não ocorrendo metanogênese (FORESTI *et al.*, 1999);

Metanogênese: esta etapa é caracterizada pela ação de arqueas metanogênicas acetoclásticas, que formam metano e material celular a partir do ácido acético, e arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, que transformam hidrogênio e dióxido de carbono em gás metano. Aproximadamente 70% da produção de metano é proveniente da redução de acetato e 30% da redução de hidrogênio (H<sub>2</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) (YANG & GUO, 1990).

Sulfetogênese: Consiste na redução de sulfato a sulfeto. Os organismos sulfetogênicos podem tornar-se um problema à digestão anaeróbia quando a água residuária possui elevadas concentrações de sulfato, pois além de diminuir o potencial energético do biogás, pois competem pelo substrato com as metanogênicas, o sulfeto produzido se torna tóxico às bactérias metanogênicas em elevadas concentrações.

Através das etapas mencionadas, é possível verificar que se estabelece um mecanismo de interações entre diversos grupos de bactérias. Desta forma bactérias metanogênicas dependem do substrato fornecido pelas acetogênicas, que são dependentes das acidogênicas e estas das hidrolíticas.

As sequências metabólicas e os grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia são apresentados na Figura 3.2.



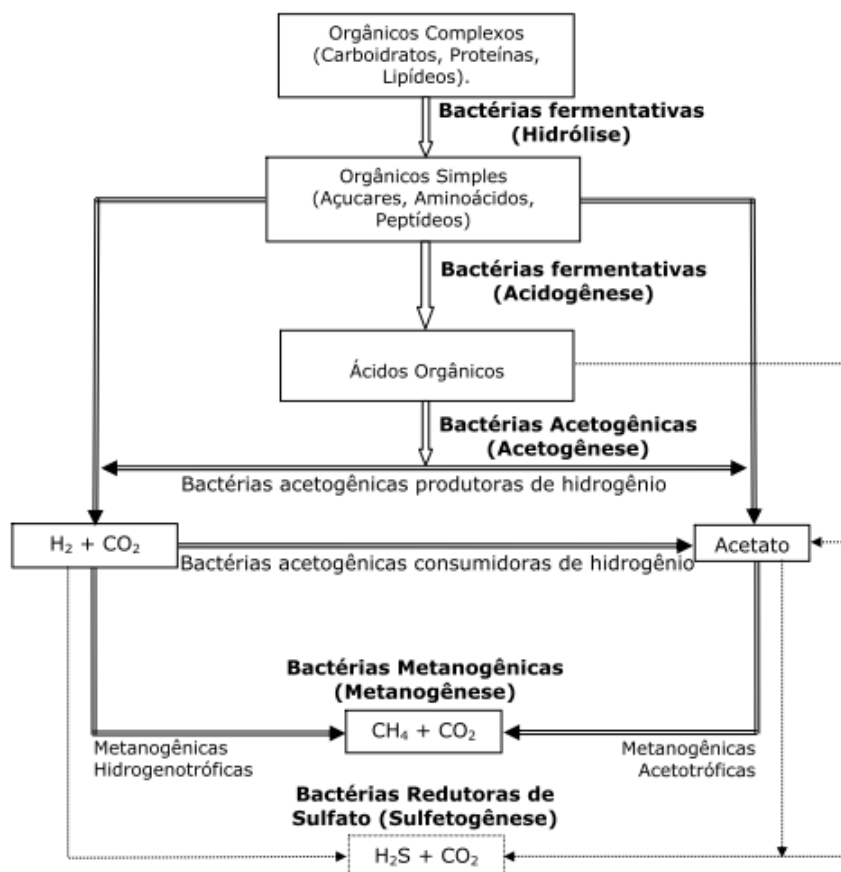


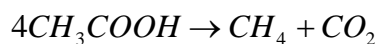
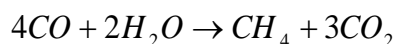
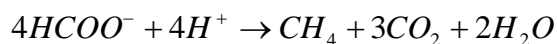
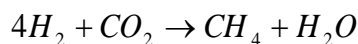
Figura 3.2 – Fases da Digestão Anaeróbia

Fonte: LETTINGA *et al.* (1996)

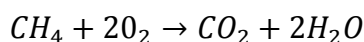
Para que a metanogênese ocorra à velocidade máxima, todas as fases da digestão anaeróbia devem ser mantidas em equilíbrio. A manutenção desse equilíbrio é influenciada pela natureza do efluente e pela intensidade e disponibilidade de H<sub>2</sub>, pois a não remoção deste pode causar diminuição drástica ou interrupção da produção de ácido acético. Portanto, a remoção contínua de H<sub>2</sub> do meio é uma condição essencial para que a fermentação metanogênica prevaleça, sendo o H<sub>2</sub> e ácido acético os responsáveis por cerca de 70% do gás metano gerado em reatores anaeróbios (CASSINI, 2003).

A fase metanogênica do processo de degradação é considerada a fase crítica, pois os microrganismos metanogênicos são muito mais sensíveis às condições desfavoráveis do meio, sendo o primeiro grupo a sofrer os efeitos de situações de estresse ambiental. Em reatores anaeróbios operados na faixa mesofílica o crescimento de microrganismos é ótimo na faixa de pH entre 6,8 e 7,4 e temperatura da ordem de 35 °C (CASSINI, 2003).

Um número limitado de substratos é utilizado pelas bactérias metanogênicas. As reações estequiométricas estão indicadas a seguir, envolvendo a oxidação de hidrogênio, ácido fórmico, monóxido de carbono, metanol, metilamina e acetato, respectivamente (METCALF & EDDY, 2003).



A demanda química do metano pode ser calculada pelo oxigênio equivalente para oxidar metano à  $CO_2$  e água, cuja equação é apresentada abaixo. Do balanço de massa resultante, têm-se que o volume de metano nas condições padrão (1 atm e  $0^\circ C$ ) é de 0,35 L  $CH_4/g$  DQO consumida, considerando que a DQO foi utilizada apenas para a produção de metano (METCALF & EDDY, 2003).



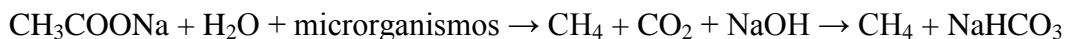
A formação de metano em reatores anaeróbios é altamente desejada, pois através deste processo a matéria orgânica, geralmente medida como DQO, é efetivamente removida, devido à baixa solubilidade em água apresentada pelo metano. Procura-se, então, criar condições favoráveis para acelerar o processo de digestão anaeróbia, envolvendo tanto o projeto do sistema de tratamento, como suas condições de operação.

Em relação ao projeto de sistemas de tratamento, uma grande quantidade de microrganismos ativos e o contato intenso entre a matéria orgânica presente no afluente e a massa microbiana no sistema são requeridos. Relacionado às condições operacionais, o pH, a presença de elementos nutrientes e a ausência de materiais tóxicos no afluente são os fatores que mais influenciam (FORESTI *et al.*, 1999). Alguns dos fatores que influenciam no processo de tratamento anaeróbio estão descritos a seguir:

Temperatura: Todos os processos de crescimento de microrganismos são dependentes de reações bioquímicas e as velocidades destas reações são influenciadas pela temperatura. A faixa de temperatura preferível para a aplicação do tratamento anaeróbio é de 25 a 35°C, pois esta apresenta as melhores taxas de reação biológica e resulta em um tratamento mais estável (METCALF & EDDY, 2003). Os microrganismos devem estar adaptados à temperatura de trabalho, o que permite classificá-las em relação a esse parâmetro em: psicrófilas, vivem em temperaturas inferiores a 20°C; mesófilas, vivem em temperaturas entre 20 e 45°C; termófilas, sobrevivem em faixa de temperatura acima de 45°C. Abaixo de 10°C o processo é, em geral, interrompido, visto que a produção de gás aumenta com a elevação da temperatura (GRANATO, 2003). A faixa termófila apresenta, portanto, maiores taxas de conversão e, desse modo, menor tempo de residência do composto no reator. Apesar disso, a maior parte dos digestores opera na faixa mesofílica por serem mais confiáveis, não necessitando de controle de temperatura.

pH: As bactérias acidogênicas, ao degradar a matéria orgânica produzem ácidos voláteis, que são responsáveis pela diminuição do pH do meio. Quando as bactérias metanogênicas começam a agir, transformam os ácidos em metano, neutralizando o meio e elevando o pH. Outros fatores que tendem a elevar o pH é o teor de amônia e a presença de bicarbonato. A concentração do íon bicarbonato atua como tamponante do sistema, impedindo que o pH diminua de modo acentuado. Os fosfatos também atuam como tamponantes do sistema. O pH do processo anaeróbio deve ser mantido entre 6 e 8, podendo ser considerado ótimo de 7 a 7,2.

Alcalinidade: Concentrações de alcalinidade entre 2.000 e 4.000 mg CaCO<sub>3</sub>/L são tipicamente necessárias para manutenção do pH neutro (METCALF & EDDY, 2003). O requerimento de produtos químicos para o controle do pH pode ter impacto econômico significativo na operação da unidade de tratamento. Para águas residuárias com alta concentração de sólidos dissolvidos, os requerimentos em alcalinidade são geralmente expressivos (METCALF & EDDY, 2001). A alcalinidade está relacionada, também, com a capacidade do reator em neutralizar os ácidos formados no processo de digestão anaeróbia e, também, em tamponar o pH do meio na eventualidade de acumulação de ácidos voláteis. Tanto a alcalinidade quanto os ácidos voláteis derivam primariamente da decomposição dos compostos orgânicos durante a digestão anaeróbia, conforme apresentado na equação abaixo (CHERNICHARO, 1997):



**Nutrientes:** A manutenção de elevadas velocidades de degradação de substrato e produção de biogás está diretamente relacionada com a disponibilidade de macro e micronutrientes no substrato. Segundo METCALF & EDDY (2003), os requisitos nutricionais para os macro nutrientes dependerá das características da água residuária e da biomassa, mas os valores típicos são de 10 a 13 g de nitrogênio, 2 a 2,6 g de fósforo e 1 a 2 g de enxofre para cada 100 g de biomassa produzida (SSV). Entre os micronutrientes, os metais traço são muito importantes para a manutenção da atividade metanogênica. Os requerimentos recomendados para ferro, cobalto, níquel e zinco são de 0,02, 0,004, 0,003 e 0,002 mg/g de acetato produzido, respectivamente (METCALF & EDDY, 2003).

A composição do biogás gerado na degradação anaeróbia depende das características do substrato utilizado e das condições de ocorrência do processo. Entretanto, a composição típica obtida através do processo de digestão anaeróbia é apresentada na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 – Principais componentes do biogás gerado em digestores anaeróbios**

<b>Gás</b>	<b>Composição (%)</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	60 – 75
Gás Carbônico (CO <sub>2</sub> )	25 – 35
Óxido de Carbono (CO)	2 – 4

Fonte: JORDÃO E PESSÔA (2011)

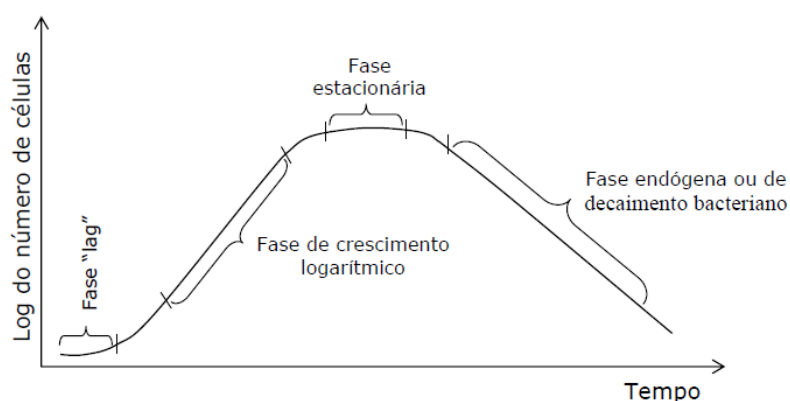
### 3.3. Cinética da digestão anaeróbia

A determinação da cinética de digestão anaeróbia é extremamente importante para a modelação de um processo bioquímico (ZAIAT *et al.*, 1997) e para determinação e otimização de parâmetros de projeto em escala real (SILVA, 2009). A cinética bioquímica consiste no estudo, sob condições pré-estabelecidas, das velocidades de crescimento dos microrganismos, velocidades de consumo de substratos e de formação de produtos. Estas velocidades devem ser expressas matematicamente por modelos que representem adequadamente a dinâmica desses processos (FORESTI *et al.*, 1999).

A velocidade de crescimento de uma população de microrganismos determina o tempo requerido para seu crescimento e está intimamente ligada a velocidade de metabolismo e utilização do substrato. Controlando adequadamente as condições ambientais e oferecendo condições favoráveis ao crescimento dos microrganismos, pode-se assegurar a estabilização efetiva do substrato degradado (CRITES & TCHOBANOGLIOUS, 1998).

Segundo METCALF & EDDY (2003), o perfil do crescimento padrão de bactérias é dividido em quatro fases (Figura 3.3), sendo elas:

1. Fase de adaptação ou Lag: fase na qual os microrganismos estão se adaptando ao meio, não ocorre reprodução celular, apenas aumento da massa celular, sem crescimento do número de indivíduos;
2. Fase de crescimento logarítmico: etapa de intenso crescimento, na qual ocorre à duplicação de número de indivíduos e da massa celular, numa taxa determinada pelo tempo de geração e capacidade de assimilação do substrato;
3. Fase estacionária: fase em que o número de indivíduos permanece constante devido a condições inadequadas para seu crescimento, como consumo total do substrato, ou devido ao estabelecimento de um equilíbrio entre células novas e células que morrem;
4. Fase endógena ou de decaimento: etapa na qual o número de microrganismos começa a diminuir devido à prevalência da morte celular.



**Figura 3.3 – Curva típica do crescimento bacteriano**

Fonte: METCALF & EDDY (2003)

A fase de crescimento logarítmico é a fase de maior interesse e importância no perfil de crescimento microbiano, pois a taxa de degradação em processos de tratamento biológico de resíduos orgânicos é função do número de microrganismos presentes.

Diversos fatores podem influenciar a cinética de populações microbianas, tais como concentração de oxigênio, tipo de substrato, concentração de nutrientes, composição do meio, tipo de acceptor final de elétrons, pH, temperatura e presença de substâncias inibidoras (ATKINSON & MAVITUNA, 1987). Entretanto, a formulação de um modelo que inclua todos os aspectos envolvidos não é prática, por isso, devem ser feitas simplificações para tornar o modelo aplicável (FORESTI *et al.*, 1999; CHERNICHARO, 2007).

A complexidade dos substratos e a interação de diversas populações de bactérias torna difícil descrever um modelo matemático que represente com clareza as reações enzimáticas dos processos biológicos que ocorrem na biodigestão anaeróbia. Na tentativa de descrever as velocidades das reações muitos pesquisadores se dedicaram a elaboração de expressões cinéticas (SILVA, 2009).

Segundo ZAIAT (2003), os parâmetros cinéticos são específicos para um determinado consórcio microbiano crescendo em uma determinada água residuária sob condições ambientais específicas. Devido a isso, um dos maiores problemas no tratamento de águas residuárias é a determinação de parâmetros cinéticos, pois não existem parâmetros universais que podem ser aplicados.

### **3.4. Digestores anaeróbios**

Os digestores anaeróbios são unidades de tratamento desenvolvidas com base nos princípios de bioquímica e microbiologia do processo de digestão anaeróbia (METCALF & EDDY, 2003). Estas unidades são geralmente aplicadas para a estabilização de lodos provenientes do tratamento de esgotos domésticos e também para o tratamento de efluentes industriais com elevada concentração de sólidos suspensos (CHERNICHARO, 1997).

Em geral, os digestores anaeróbios são constituídos tanques circulares cobertos, em concreto armado, cujo diâmetro varia de 6 a 38 metros e a profundidade varia entre 7 e 14 metros (CHERNICHARO, 1997). De acordo com JORDÃO E PESSÔA (2011), estas unidades podem ser classificadas em função das seguintes características:

- Forma: cilíndricos, prismáticos de seção retangular e ovais;
- Cobertura: sem cobertura e com cobertura, com tampa fixa ou móvel;
- Homogeneização: com recirculação do substrato, com recirculação do gás e com agitadores;

- Temperatura de digestão: com aquecimento e sem aquecimento;
- Estágios: simples estágio e múltiplo estágio;
- Carga de sólidos voláteis aplicada: baixa carga e alta carga.

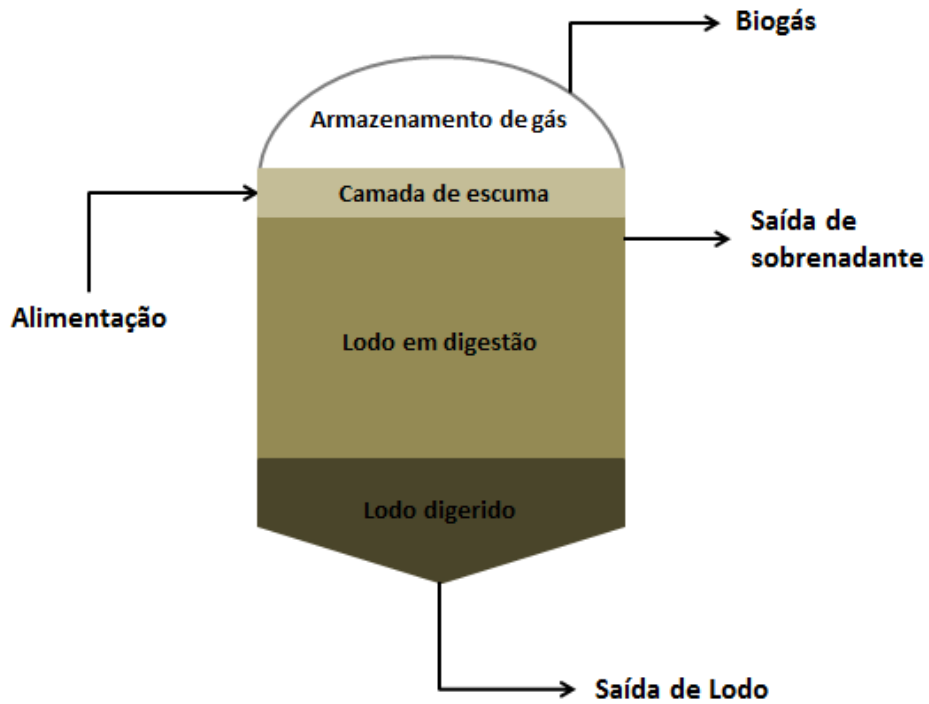
Com relação à forma, segundo JORDÃO E PESSÔA (2011), a prática norte-americana mais tradicional adota digestores cilíndricos com grande diâmetro e altura relativamente baixa. Segundo os mesmos autores, a escola alemã adota digestores mais altos e estreitos.

A digestão anaeróbia pode ocorrer em estágio único, no qual na mesma unidade ocorrem a digestão, adensamento e a formação de sobrenadante, ou em múltiplo estágio, o qual geralmente é realizado em duas unidades, um digestor primário e um digestor secundário (JORDÃO E PESSÔA, 2011). Segundo CHERNICHARO (1997) as três principais configurações de digestores que têm sido aplicadas são: digestor anaeróbio de baixa carga (Figura 3.4), digestor anaeróbio de um estágio e alta carga (Figura 3.5) e digestor anaeróbio de dois estágios e alta carga (Figura 3.6).

O digestor anaeróbio de baixa carga é geralmente aplicado em pequenas estações de tratamento. Este não dispõe de dispositivos de mistura, sendo usualmente constituído de um único tanque (CHERNICHARO, 1997). Já o digestor anaeróbio de estágio único e alta taxa incorpora mecanismos de aquecimento e mistura e tem como resultado mais estabilidade no processo e um volume de tanque reduzido (CHERNICHARO, 1997).

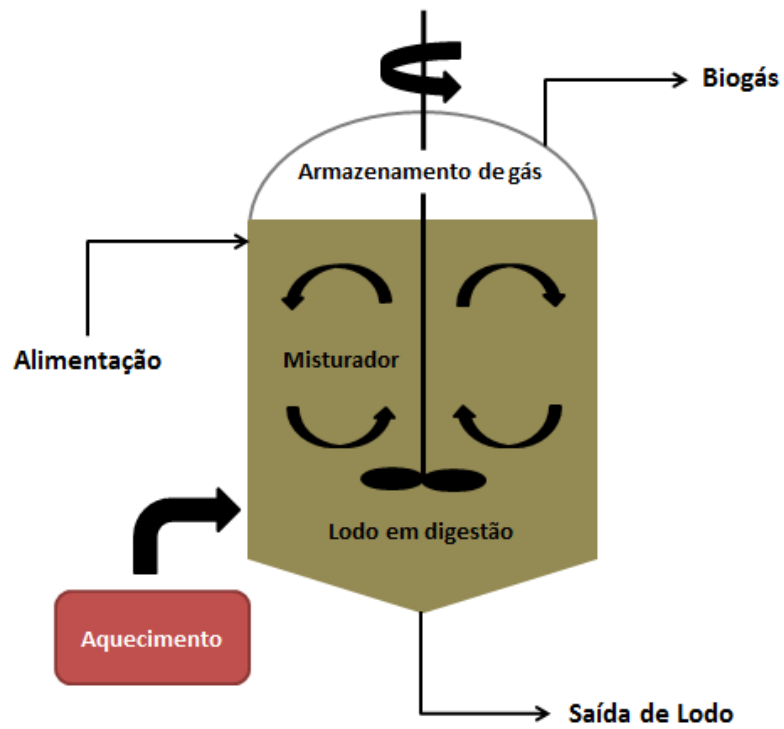
Na digestão em múltiplo estágio o digestor primário é responsável pela evolução das principais fases da digestão anaeróbia (acidificação, regressão ácida, gaseificação e liquefação), sendo sua principal finalidade a separação das fases líquido-sólido-gás, já no digestor secundário ocorre principalmente o adensamento do lodo (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

Como muitos dos princípios da digestão anaeróbia não foram incorporados no passado, um grande número de métodos empíricos vem sendo usados para desenvolver digestores anaeróbios (METCALF & EDDY, 2003). Dentre os métodos de dimensionamento encontram-se o critério da população contribuinte, o critério da redução volumétrica e o critério das taxas de aplicação de sólidos (JORDÃO E PESSÔA, 2011).



**Figura 3.4 – Digestor anaeróbico de baixa carga**

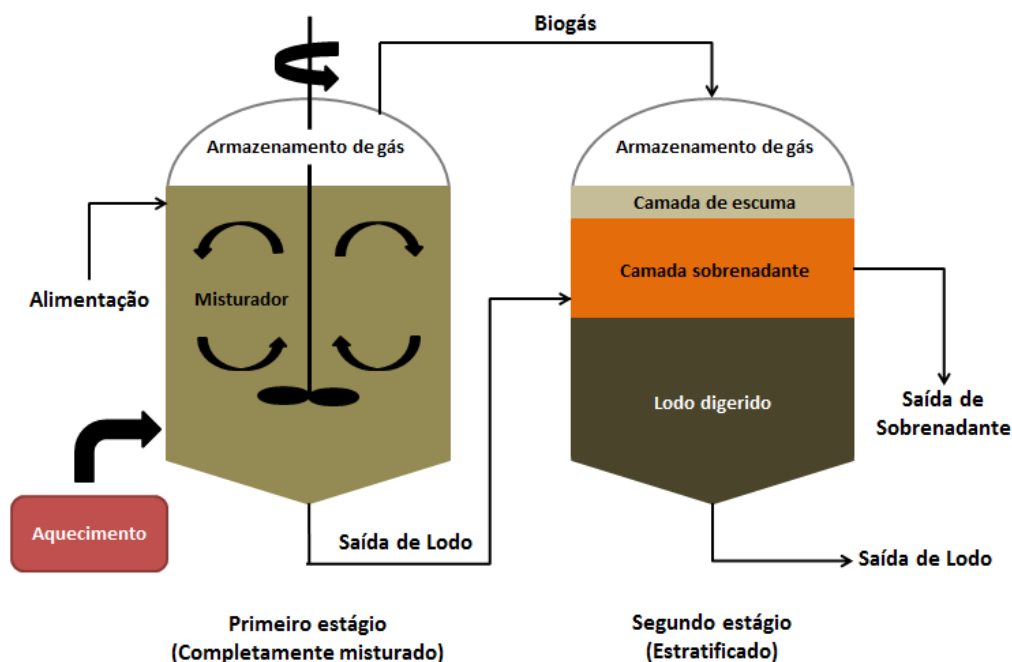
Fonte: Adaptado de CHERNICHARO (1997)



**Figura 3.5 – Digestor anaeróbico de único estágio e alta carga**

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)





**Figura 3.6 – Digestor anaeróbico de dois estágios e alta carga**

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (2003)

O método do critério da população contribuinte é feito com base na determinação de um volume útil de reator por população equivalente (JORDÃO E PESSÔA, 2011). Este método é mais aplicado para lodos de estações de tratamento de esgotos domésticos, para os quais são conhecidos os dados empíricos necessários.

O método do critério da redução volumétrica determina o volume com base nos fenômenos da digestão anaeróbica, tais como a gaseificação, liquefação, remoção de lodo e de sobrenadante do lodo digerido (JORDÃO E PESSÔA, 2011). A equação que descreve o volume necessário para a digestão é:

$$V = \left[ V_f - \frac{2}{3}(V_f - V_d) \right] \times t$$

Na qual:

$V$  = volume útil total de lodo no digestor ( $m^3$ );

$V_f$  = volume de lodo fresco afluente ao digestor ( $m^3/d$ );

$V_d$  = volume de lodo digerido removido do digestor ( $m^3/d$ );

$T$  = tempo de digestão.

O método do critério das taxas de aplicação de sólidos é um dos mais utilizados para determinar o volume de digestores anaeróbios (METCALF & EDDY, 2003). Este critério é bastante racional, sendo adotada uma taxa de aplicação de sólidos em suspensão voláteis (SSV) de acordo com o tipo de digestão (JORDÃO E PESSÔA, 2011). Os critérios típicos de projeto aplicados as principais configurações de digestores anaeróbios, de acordo com a taxa de aplicação de sólidos, são apresentadas na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5 – Parâmetros de projeto para dimensionamento de digestores anaeróbios**

<b>Tipo de digestor</b>	<b>Carga de sólidos (kgSSV/m<sup>3</sup>.d)</b>	<b>Tempo de retenção celular (d)</b>
<b>Baixa carga</b>	0,6 – 1,6	30 – 60
<b>Alta carga</b>	1,6 – 3,2	15 – 20

Fonte: CHERNICHARO (1997) *apud* METCALF & EDDY (1991)

### 3.5. Geração de energia através da combustão do biogás

Dentre os possíveis aproveitamentos do biogás gerado na digestão anaeróbia, encontram-se a geração de energia elétrica, a geração de energia térmica, a geração conjunta de energia térmica e elétrica (também chamada cogeração) e o aproveitamento do biogás como combustível para outras unidades (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

Para analisar a viabilidade do aproveitamento do biogás é necessário levar em conta a equivalência energética entre o biogás e o combustível a ser substituído, além dos aspectos técnicos de purificação, implantação do sistema produtor de energia e sua operação (JORDÃO E PESSÔA, 2011). Estas considerações contribuem para uma previsão adequada das adaptações necessárias ao emprego do biogás como recurso energético (ALVES, 2000).

A análise de equivalência energética é realizada através da comparação do parâmetro poder calorífico do combustível (ALVES, 2000). O poder calorífico de um gás é definido como a quantidade de energia liberada pela queima de uma unidade de volume do gás (JORDÃO E PESSÔA, 2011). A Tabela 3.6 apresenta o poder calorífico de alguns gases comumente utilizados como combustível e o poder calorífico do biogás advindo da digestão anaeróbia.

Tabela 3.6 – Poder calorífico de alguns gases usados como combustível

Gás	Poder Calorífico (kJ/m <sup>3</sup> )
Propano comercial	45.800
Butano comercial	44.600
Gás natural	37.300
Metano	35.800
Biogás proveniente da digestão <sup>(*)</sup>	22.400

(\*) Admitindo-se 65% de metano no biogás

Fonte: JORDÃO E PESSÔA (2011)

Embora se verifique que o biogás gerado na digestão anaeróbia possui poder calorífico menor que o dos gases comerciais, seu uso é vantajoso, podendo ser praticada a cogeração de energia elétrica e térmica (JORDÃO E PESSÔA, 2011). O biogás gerado pela indústria cervejeira possui uma concentração de metano em torno de 60% e apresenta um valor mais conservativo de poder calorífico, o qual é inferior, na ordem de 20 MJ/Nm<sup>3</sup> (ETHERRIDGE, 2003 *apud* IANNICELLI, 2008).

Dependendo da aplicação a qual será dada ao biogás, este pode ser utilizado nas condições em que é gerado, entretanto, em alguns casos a redução da concentração de H<sub>2</sub>S, de CO<sub>2</sub>, de umidade e/ou a elevação da pressão podem ser necessárias (ALVES, 2000). O uso do biogás em motores, por exemplo, exige redução na concentração de alguns compostos, redução de umidade e, principalmente, elevação da pressão (IANNICELLI, 2008). Isto é necessário porque a presença de substâncias não combustíveis, tais como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima do biogás, tornando-o menos eficiente, pois o poder calorífico do biogás diminui com a maior presença de impurezas (ALVES, 2000).

### 3.5.1. Aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica

A conversão de biogás em energia elétrica pode ser realizada de diversas formas, dentre elas estão a utilização de motores de combustão interna, turbinas e microturbinas a gás e células combustíveis (JORDÃO E PESSÔA, 2011). As tecnologias mais utilizadas são os motores de combustão interna de Otto e as microturbinas a gás (PRATI, 2010).

O rendimento para a produção de energia através da utilização do biogás ainda é baixa, em geral da ordem de 25 a 35 % (JORDÃO E PESSÔA, 2011). A Tabela 3.7

apresenta a eficiência na geração de energia elétrica das principais tecnologias que podem utilizar biogás como combustível.

**Tabela 3.7 – Eficiência das principais tecnologias para geração de energia elétrica utilizando biogás**

<b>Tecnologia</b>	<b>Faixa de potência (kW)</b>	<b>Eficiência (%)</b>
Motor a combustão	100 – 4.000	30 – 42
Turbina a gás	1.000 – 4.600	25 – 38
Microturbina a gás	70 – 250	24 – 26
Célula combustível	200 – 300	38 – 42

Fonte: JORDÃO E PESSÔA (2011)

Os motores de combustão interna são equipamentos que transformam energia térmica de um combustível em energia mecânica através do acionamento de pistões confinados em cilindros, sendo a energia elétrica obtida através de geradores acoplados aos motores (JORDÃO E PESSÔA, 2011). Os ciclos de operação Otto e diesel são os mais comumente utilizados (JORDÃO E PESSÔA, 2011). Os motores de combustão interna ciclo de Otto, necessitam de pequenas alterações para utilizar o biogás como combustível, porém não são os mais indicados para a geração de energia elétrica (PRATI, 2010). Já o ciclo de motor a diesel pode ser utilizado de duas formas, a otolização, a qual necessita de grandes modificações no motor, e a conversão biocombustível, na qual a ignição é realizada por uma pequena injeção de diesel e não são necessárias modificações no motor (PRATI, 2010). Este sistema é mais robusto e apresenta menor custo para uma mesma potência, comparado ao motor de ciclo Otto. O principal fator contrário a tecnologia de motores de combustão interna é a elevada poluição atmosférica causada, pois a combustão realizada nos motores emite altas concentrações de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, no entanto, estas podem ser controladas (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

Nas turbinas, que são equipamentos compostos por compressor, câmara de combustão e turbina de expansão, a produção da energia ocorre através da geração de uma reação exotérmica a alta pressão que transfere energia química do combustível para o gás, o qual é posteriormente expandido na turbina, de onde é extraída a energia mecânica para o acionamento do compressor e da carga acoplada ao eixo, que pode ser constituída por um gerador de energia elétrica, bombas, compressores ou um eixo motor (JORDÃO E PESSÔA, 2011). As microturbinas tem sido mais usadas recentemente

para capacidades de produção menores, da ordem de 70 a 250 kW e a principal vantagem destas sobre os motores de combustão interna está na baixa emissão atmosférica (JORDÃO E PESSÔA, 2011). Entretanto, as microturbinas apresentam elevados custos e um tempo de vida útil baixo operando com biogás (SOUZA *et al.*, 2004 *apud* PRATI, 2010).

### 3.5.2. *Aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica*

O aproveitamento do biogás para geração de energia térmica consiste na geração de calor utilizando o biogás como combustível. Da mesma forma que se define eficiência energética elétrica, define-se a eficiência térmica, a qual trata do aproveitamento do poder calorífico do biogás (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

Nos casos em que o biogás é usado em motores ou turbinas para gerar eletricidade, é possível a realização da cogeração de energia, na qual é possível aproveitar o calor residual gerado nestas máquinas para satisfazer a necessidades de aquecimento do sistema (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

A aplicação de um sistema de cogeração de energia permite elevar a eficiência do conjunto do sistema (ALVES, 2000). No uso de moto-geradores de ciclo Otto ou Diesel e no uso de turbinas, que tem seus rendimentos em torno de 30 a 40%, o uso de gases de escape gerando vapor pode elevar a eficiência do conjunto para aproximadamente 70% (SILVA, 1997 *apud* ALVES, 2000).

Em diversas operações do processo de produção da cerveja o uso de água quente ou vapor de processo é requerido, como por exemplo, na fervura do mosto e na lavagem de garrafas. Esta água quente e vapor são produzidos em caldeiras, que podem ser alimentadas com lenha, óleo combustível, óleo diesel ou gás natural (SANTOS E RIBEIRO, 2005). Atualmente, já existem sistemas que reaproveitam o biogás gerado na unidade de tratamento anaeróbico da Estação de Tratamento de Efluentes. Algumas indústrias cervejeiras têm optado por instalar sistemas de cogeração, que consistem em uma turbina a gás natural com recuperação de calor para a produção de vapor e energia elétrica para o processo (SANTOS E RIBEIRO, 2005).

### 3.5.3. *Aproveitamento do biogás para geração de energia mecânica*

Também é possível, além da recuperação de energia para a geração de eletricidade e calor, o aproveitamento do biogás diretamente para fins mecânicos, como

a movimentação de bombas e compressores de ar (JORDÃO E PESSÔA, 2011). A principal vantagem deste tipo de aproveitamento é a geração direta de energia mecânica.

#### 3.5.4. Estudo de aproveitamento do biogás

A definição da melhor alternativa para o aproveitamento do biogás deve analisar os aspectos econômicos e ambientais, devendo ter em conta também as possíveis dificuldades em relação à operação e manutenção dessas unidades (JORDÃO E PESSÔA, 2011). A Tabela 3.8 apresenta algumas características de sistemas de aproveitamento de biogás para geração de energia, tais como pré-tratamentos necessários para utilização da tecnologia, eficiência térmica e eficiência elétrica.

**Tabela 3.8 – Características de sistemas de aproveitamento do biogás para geração de energia**

<b>Aproveitamento</b>	<b>Pré-tratamento necessário</b>	<b>Eficiência térmica (%)</b>	<b>Eficiência elétrica (%)</b>
Caldeiras	Nenhum	75 – 80	-
Energia mecânica	U, H, S	≈ 46	26 – 28
Cogeração de energia elétrica/térmica	U, H, S	45 – 50	30 – 35
Microturbinas	U, S	35 – 40	24 – 28
Células combustíveis	U, H	≈ 37	≈ 40

(\*) U = remoção de umidade; H = remoção de H<sub>2</sub>S; S = remoção de siloxanos.

Fonte: JORDÃO E PESSÔA (2011)

### 3.6. Utilização da levedura residual como ração animal

Em um sistema de produção animal os gastos com a nutrição dos animais representam a maior parte dos custos. Devido a isso, a utilização de aditivos alimentares apresenta-se como uma boa alternativa para reduzir as despesas do sistema produtivo (OLIVEIRA *et al.*, 2005). Na alimentação de ruminantes a levedura residual de cerveja se caracteriza como um aditivo probiótico (FERNANDES *et al.*, 2010).

Os aditivos alimentares são, segundo a Lei nº 6.198/1974, que dispõe sobre a inspeção e a fiscalização obrigatórias dos produtos destinados à alimentação animal, substâncias intencionalmente adicionadas ao alimento, com a finalidade de conservar, intensificar ou modificar suas propriedades, desde que não prejudiquem seu valor

nutritivo. Os aditivos probióticos são definidos como cepas de microrganismos vivos viáveis que agem como auxiliares na recomposição da flora microbiana do trato digestivo dos animais, diminuindo o número dos microrganismos patogênicos ou indesejáveis (MAPA, 2004).

A levedura residual é utilizada como aditivo na ração animal por possuir boas características nutricionais, tais como ser uma boa fonte de proteínas, nitrogênio e outros nutrientes, além de possuir boa digestibilidade. Segundo o GRUPO ULLMAN (2011), a composição protéica, de alto valor biológico, permite o melhor desenvolvimento das bactérias do rúmem. Os elevados teores de carboidratos favorecem o processo de fermentação ruminal e melhoram o aproveitamento das fibras da dieta, propiciando mais saúde aos animais. Os elevados teores de vitaminas do Complexo B estimulam o sistema imunológico dos animais, o que favorece a saúde dos mesmos. A elevada biodegradabilidade dos nutrientes presentes na levedura permite uma melhor absorção ruminal de seus componentes. Assim, a soma destes fatores contribui para o melhor aproveitamento da dieta pelos animais, pois aumenta a eficiência de utilização da energia e dos nutrientes no rúmem, impactando de forma positiva o metabolismo do animal e determinando melhores resultados no desempenho produtivo (FERNANDES *et al.*, 2010).

Embora a levedura residual de cervejaria apresente boas características como aditivo alimentar, esta não proporciona um bom resultado em bovinos de corte alimentados por pasto, sendo pouco utilizada para esta categoria. Este subproduto é mais aplicado na alimentação da bovinocultura de leite e em sistema de produção animal que utilizem dieta rica em grãos (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

A caracterização centesimal e os macro e micronutrientes presentes na levedura residual de cervejaria encontram-se, respectivamente, na Tabela 3.9 e Tabela 3.10. Vale ressaltar que resíduos provenientes de diferentes processos produtivos podem apresentar alterações em sua composição química, dependendo do processo utilizado para a obtenção da cerveja (SOUZA, 2004).

Tabela 3.9 – Composição centesimal da levedura residual de cervejaria

Componentes (%)	Costa <i>et al.</i> (2012)	Vilela <i>et al.</i> (2000)	Sgarbieri <i>et al.</i> (1999)	Caballero-Córdoba <i>et al.</i> (1997)	Guzmán-Juarez (1983)*	Farnum & Cleland (1975)*
Proteína	51,13	46,55	48,74	48,51	45 – 49	49,80
RNA	-	5,70	5,70	7,52	8 -12	8,40
Lípidios	6,74	3,15	3,33	3,44	4 -7	4,91
Cinzas	6,98	7,99	8,55	8,33	5-10	5,10
Carboidratos totais	35,11	-	35	32,86	26 – 25	-
Fibra solúvel	-	23,58	22,52	9,59	-	-
Fibra insolúvel	-	1,99	1,88	2,60	-	-

\*Fonte: CABALLERO-CÓRDOBA *et al.* (1997)

Tabela 3.10 – Macro e micronutrientes presentes na levedura residual de cerveja

Macrominerais	
Ca	0,15 %
P	1,47 %
S	0,47 %
Na	0,08 %
Cl	0,32 %
Mg	0,26 %
K	1,81 %
Microminerais	
Co	0,54 ppm
Cb	41,3 ppm
Fe	89 ppm
I	0,38 ppm
Mn	7,0 ppm
Se	0,98 ppm
Zn	42 ppm

Fonte: NCR (1998) *apud* SOUZA (2004)

A levedura residual de cervejaria é obtida na forma de suspensão, na qual as células de levedura estão suspensas em uma fase líquida dispersa. Deste modo, para que este material possa ser utilizado como complemento alimentar na ração de animais é necessário que se realize a concentração da levedura, de modo a obter um material pastoso, seguida de um processo de secagem (MELO, 2010). A secagem é necessária para a obtenção de um produto que obedeça as especificações exigidas pelo mercado, tais como cor, granulometria, teor de proteína e teor de umidade (SILVA, 2004 *apud* ROCHA *et al.*, 2007)



Dentre os processos de secagem desenvolvidos, os que obtiveram maior sucesso comercial e são usualmente aplicados à levedura residual são os do tipo tambor ou rolo rotativo e o *Spray-dryer* (ZANUTTO *et al.*, 1999; MELO, 2010). Em geral, as unidades que adotam o secador tipo rolo rotativo são as de pequeno porte, visando minimizar investimentos, já as de maior porte optam pelo uso do *Spray-dryer* (ZANUTTO *et al.*, 1999). Entretanto, existem empresas que fabricam sistemas com rolos rotativos que variam de 0,75 m<sup>2</sup> a 28 m<sup>2</sup> (ANDRITZ, 2014), podendo atuar em sistemas de grande porte.

No método de secagem através de rolos rotativos, também conhecido como *Drum Dryer*, a secagem da levedura é realizada a partir da transmissão de calor obtida pelo contato direto com a superfície aquecida do rolo rotativo, a qual pode atingir temperaturas de até 120°C sem contato com o ar (MOTRICE, 2013). Após secagem no rolo rotativo, a levedura residual seca é transportada à um moinho, que reduz o tamanho das partículas para padronizar e obter a granulometria desejada. Em seguida, a levedura está preparada para ser embalada (ANDRITZ, 2014).

Comparado com o processo de secagem direta, a secagem indireta nos rolos rotativos exige menos ar quente para a obtenção da evaporação e, em adição, o calor necessário pode ser gerado através de vapor saturado (ANDRITZ, 2014). Em adição, devido à maior facilidade no controle do tempo de contato do produto com o secador, pode-se obter produtos com melhores características de cor e sabor, pois pode-se controlar a “Reação de Maillard”, que é uma reação química que resulta em produtos que dão sabor, odor e cor aos alimentos (MOTRICE, 2013).

No *Spray-dryer*, a levedura residual é bombeada para uma câmara de secagem passando por um cabeçote que gira em alta velocidade, atomizando a levedura. Esta atomizada apresenta-se em forma de névoa, que combinada com um fluxo de ar quente seca instantaneamente e precipita-se no fundo da câmara, a qual é em forma de cone. Partículas mais finas são separadas em ciclones externos e o produto final é descarregado através de uma válvula rotativa (MOTRICE, 2013). Este sai pronto para ser empacotado, não necessitando de unidades para peneirar ou moer, e caracteriza-se pela uniformidade, granulometria, cor e pela preservação dos aminoácidos (ZANUTTO *et al.*, 1999).

Devido à temperatura e ao tempo de contato durante a secagem, o *Spray Dryer* quando comparado ao Rolo Rotativo pode resultar em um produto de melhor qualidade nutricional (ZANUTTO *et al.*, 1999). Entretanto, na secagem utilizando o *Spray Dryer*,

devido a maior sensibilidade a variações de concentração, este sistema necessita de um maior controle da porcentagem de sólidos da levedura residual. Deste modo, o controle da secagem é mais complexo e precisa ser controlado por uma malha de automação, o que agrega custo ao processo (MOTRICE, 2013).

De modo geral, o processo para obtenção da levedura residual como ração animal é apresentado Figura 3.7.



Figura 3.7 – Processo de utilização da levedura residual como ração animal

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Etapa experimental

Para o estudo de viabilidade técnico-econômica da digestão de levedura residual de cervejaria para a cogeração de energia, foram realizados experimentos de degradação anaeróbia do composto. A etapa experimental foi realizada durante Estágio de Pesquisa no Exterior fomentado pela FAPESP no período de 4 de março de 2013 à 4 de julho de 2013.

O procedimento experimental se dividiu em três etapas:

- (I) Comparação entre as relações substrato/inóculo (S/I);
- (II) Avaliação dos efeitos dos pré-tratamentos na composição dos substratos;
- (III) Análise do efeito da separação de fases e pré-tratamentos aplicados na produção de biogás através da digestão anaeróbia.

A primeira e terceira etapas foram estudadas mediante ensaios de biodegradabilidade anaeróbia, em batelada, conhecidos como “*Biochemical Methane Potential (BMP) tests*”, ou ensaios BMP, que visam à determinação do potencial de produção de metano de um substrato sob condições controladas.

Nestes testes, os frascos-reatores foram incubados em um *shaker*, sob agitação de 150 rpm, e mantidos em uma câmara climatizada, a 35°C. Todas as condições foram realizadas em triplicata e um branco, contendo somente inóculo, também foi digerido, sendo este aplicado em duplicata, para contabilizar a produção de metano referente ao inóculo. Deste modo, a produção de biogás e de metano medida nos reatores contendo somente o inóculo foi descontada das produções obtidas nas outras condições, visando conhecer a real produção obtida pelo substrato. A biodegradabilidade (B) foi calculada segundo a Equação 4.1.

$$B = 100 \times \frac{\text{Produtividade de metano (mL de CH}_4\text{/gDQO)}}{\text{Produtividade teórica de metano (mL de CH}_4\text{/gDQO)}} \quad (4.1)$$

Na primeira etapa, a melhor relação substrato/inóculo (S/I) foi determinada para a levedura residual através de uma série de ensaios BMP em que foram aplicadas 3 relações S/I, sendo elas 0,25; 0,50 e 0,75 gSV/gSV. Avaliou-se a produção e produtividade em função de SV e DQO adicionados.

Na segunda etapa, para avaliar os efeitos dos pré-tratamentos na composição dos substratos, foram realizadas as análises físico-químicas descritas no item 4.1.6, antes e depois da aplicação dos pré-tratamentos. Visou-se avaliar principalmente a ocorrência de solubilização de componentes. Além destas, foi realizada uma análise microscópica, na qual se objetivou visualizar os efeitos dos pré-tratamentos no rompimento das células de levedura.

Os efeitos da separação de fases e dos pré-tratamentos na produção de biogás foram analisados através de outra série de ensaios BMP, nos quais se utilizou a melhor relação S/I obtida na primeira etapa do experimento. O ensaio desta terceira etapa foi conduzido conforme o ensaio da primeira etapa. A Tabela 4.1 apresenta as condições aplicadas neste experimento e a Figura 4.1 apresenta um esquema das etapas 2 e 3.

**Tabela 4.1 – Condições aplicadas na terceira etapa experimental**

<b>Substrato</b>	<b>Condição aplicada</b>	<b>Sigla</b>
<b>Levedura Residual</b>	Sem pré-tratamento	Sst
	Pré-tratamento térmico	Stt
	Pré-tratamento ultrassônico	Stu
<b>Fase Sólida</b>	Sem pré-tratamento	FSst
	Pré-tratamento térmico	FStt
	Pré-tratamento ultrassônico	FStu
<b>Fase Líquida</b>	Sem pré-tratamento	FLst

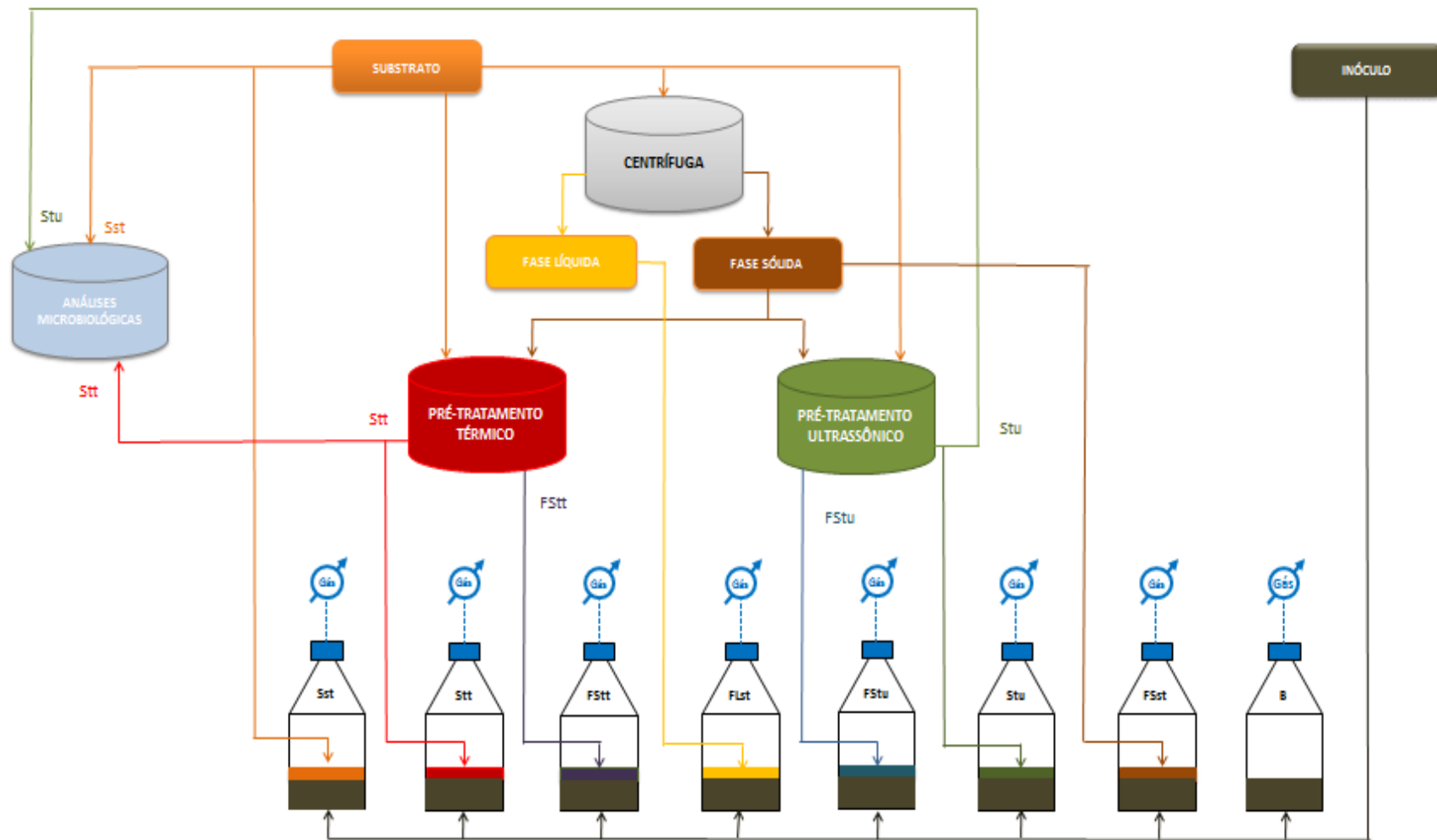


Figura 4.1 – Fluxograma das Etapas Experimentais 2 e 3

#### 4.1.1. Substrato

Utilizou-se como substrato levedura residual do processo de produção de cerveja cedida pela Cervejaria Heinekein, situada em San Sebastián de los Reyes (Madri, Espanha). O substrato foi coletado ao final do processo de fermentação, nos cones de sedimentação dos fermentadores. O material consistia em, aproximadamente, 55% de levedura e 45% de cerveja não processada (mosto fermentado).

Verificando a grande porcentagem de cerveja presente no substrato, e visando a uma melhor eficiência energética na produção de metano, decidiu-se concentrá-lo, centrifugando-o por 5 minutos a 5.000 rpm. Da centrifugação, foram obtidas as fases sólida e líquida do substrato principal.

Deste modo, além da levedura residual, ambas as fases também foram aplicadas como substrato, a fim de avaliar seu potencial de geração de metano na digestão anaeróbia. No total foram utilizados 3 tipos de substrato: a levedura residual (LR), sua fase sólida (FS) e sua fase líquida (FL). Suas características encontram-se na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Características iniciais dos substratos aplicados**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Levedura Residual</b>	<b>Fase Sólida</b>	<b>Fase Líquida</b>
<b>DQO</b>	(g/kg)	267,25	370,00	188,14
<b>ST</b>	(g/kg)	145,44	220,89	40,67
<b>SV</b>	(g/kg)	135,97	204,44	35,86
<b>NTK</b>	(mg/kg)	10.464,88	20.566,13	1.600,12
<b>N-NH4+</b>	(mg/kg)	1.720,52	3.977,81	-

#### 4.1.2. Inóculo

Como inóculo, utilizou-se lodo advindo do digestor anaeróbio da Estação de Tratamento de Águas Residuárias (EDAR - *Estación Depuradora de Aguas Residuales*), situada na cidade de Valladolid, na Espanha. O inóculo possuía 14,0 g DQO/kg e, aproximadamente, 1,5% de sólidos totais (15,29 g ST/kg), sendo destes cerca de 60% sólidos voláteis (9,31 g SV/kg).

Antes do início de cada etapa, o inóculo foi incubado por 5 dias à temperatura de 35°C, como sugerido por ANGELIDAKI *et al.* (2009), a fim de recuperar sua atividade

microbiana e eliminar resíduos de matéria orgânica biodegradável, visando minimizar a produção de metano advinda do inóculo.

#### 4.1.3. *Biodigestores*

Foram executados ensaios de biodegradabilidade anaeróbia, utilizando como biodigestores frascos-reatores de 300 mL fechados com tampas de butila. Devido a uma pequena variabilidade do volume dos frascos, foi necessário calibrá-los para conhecer seu volume real. A calibração foi realizada através da pesagem do frasco vazio e posterior pesagem do frasco completamente preenchido com água. Deste modo, conhecendo-se o volume do frasco e o volume adicionado (substrato e inóculo) foi possível determinar o volume livre (*headspace*) em cada biodigestor.

#### 4.1.4. *Pré-tratamentos*

Neste experimento foram aplicados dois métodos de pré-tratamento, sendo eles o pré-tratamento térmico e o pré-tratamento ultrassônico. Os substratos utilizados foram: levedura residual e fase sólida. A aplicação na fase líquida não foi realizada porque seria desnecessária, visto que nesta não havia grande quantidade de partículas sólidas e a maioria dos componentes já se encontrava solubilizada.

##### *Pré-tratamento térmico*

O sistema de pré-tratamento térmico consistiu em uma caldeira de vapor, que era alimentada por um tanque de água, um tanque de reação termicamente vedado, que possuía uma entrada e uma válvula de descompressão, e um tanque de “*flash*”, onde ocorria uma rápida descompressão. Foram utilizados diferentes tanques de reação para os substratos, os quais se diferenciavam pela peça de entrada de substrato. A entrada adaptada para líquidos foi utilizada para a levedura residual e a adaptada para sólidos e lodos, foi utilizada para a fase sólida. Entretanto, ambos os tanques de reação possuíam o volume de 2 L e foram operados da mesma maneira. O tanque de “*flash*” possuía 5 L.

Após a introdução do substrato dentro do tanque de reação, a qual foi realizada manualmente, a válvula que transmite vapor da caldeira para o tanque de reação foi aberta, até que a pressão e a temperatura atingissem o nível de referência. Estes parâmetros foram medidos por equipamento acoplado ao tanque de reação e foram controlados manualmente, através da válvula que regulava o fluxo de vapor. Após o tempo de operação, o fluxo de vapor foi interrompido e a válvula de despressurização

foi aberta, fazendo com que o substrato hidrolisado se dirigisse ao tanque de “flash”. Em seguida, abriu-se o tanque de flash e coletou-se o substrato hidrolisado.

Aplicou-se um tempo de operação de 15 minutos, as temperaturas nos tanques de reação foram de  $165\pm 3^{\circ}\text{C}$ , na hidrólise da levedura residual, e  $170\pm 3^{\circ}\text{C}$ , na hidrólise da fase sólida, e a pressões aplicadas em ambos os casos foram  $8\pm 0,5$  bar.

#### Pré-tratamento ultrassônico

O pré-tratamento ultrassônico foi realizado utilizando um homogeneizador ultrassônico, Hielscher modelo UP400S, em modo batelada. O equipamento consiste em um sonotrodo (frequência 24 kHz e potência máxima teórica 400 W), ao qual um béquer de plástico contendo o substrato foi acoplado e mantido pelo tempo de aplicação. A potência aplicada pelo sonotrodo foi verificada por um potenciômetro acoplado a sua tomada.

A energia específica aplicada foi determinada conforme a Equação 4.2.

$$E_s = \frac{P \times t}{V \times ST_0} \quad (4.2)$$

Na qual:

$E_s$ : Energia específica aplicada (kJ/kg ou J/mL);

P: Potência do equipamento (W);

t: Tempo de aplicação (s);

V: Volume ou massa da amostra (mL ou g);

$ST_0$ : Concentração inicial de sólidos (g/kg).

O pré-tratamento foi aplicado por 15 minutos e as energias específicas aplicadas obtidas foram de 1.400 kJ/kg ST, para a levedura residual, e 1.300 kJ/kg ST, para a fase sólida.

#### 4.1.5. Montagem do ensaio

A montagem do ensaio consistiu na preparação e montagem dos frascos-reatores para o desenvolvimento do experimento. Primeiramente, calculou-se a quantidade de substrato e inóculo a ser adicionada. Este cálculo foi realizado utilizando a Equação 4.3. Foram consideradas as três relações substrato/inóculo em estudo (0,25; 0,50 e 0,75) e



pré-determinou-se a massa de inóculo a ser adicionada, de modo a obter um “headspace” adequado. Cada condição foi montada em triplicata e um branco, contendo somente inóculo também foi digerido.

$$\frac{S}{I} = \frac{C_s \times M_s}{C_I \times M_I} \quad (4.3)$$

Na qual:

S/I = Relação substrato/inóculo;

C<sub>s</sub> = Concentração de SV do substrato (g SV/g);

M<sub>s</sub> = Massa de substrato;

C<sub>I</sub> = Concentração de SV do inóculo (g SV/g);

M<sub>I</sub> = Massa de inóculo (*pré-determinada*).

Conhecendo as massas a serem adicionadas, iniciou-se a preparação da montagem. Nesta etapa, preparou-se o inóculo adicionando-se 5 g/L de bicarbonato de sódio, 1 mL/L de macronutrientes e 1mL/L de micronutrientes, a fim de proporcionar condições ideais para a atividade dos microrganismos anaeróbios. A composição dos macro e micronutrientes é apresentada na Tabela 4.2.

O inóculo suplementado e o substrato foram colocados em agitadores eletromagnéticos e mantidos durante a montagem, para obter uma mistura o mais homogênea possível. Em seguida, iniciou-se a montagem adicionando a massa calculada de cada componente aos frascos-reatores. Para finalizar, após a adição do substrato e do inóculo, os frascos foram lavados com gás nitrogênio por 15 minutos e selados com a tampa de butila. Este procedimento foi realizado a fim de propiciar as condições anaeróbias necessárias ao ensaio.

Tabela 4.2 – Composição dos macro e micronutrientes adicionados ao inóculo

<b>Micronutrientes</b>			
<i>Substância</i>	<i>Concentração</i>		
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	37 g/L		
NH <sub>4</sub> Cl	170 g/L		
CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	8 g/L		
MgCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	9 g/L		
<b>Macronutrientes</b>			
<i>Substância</i>	<i>Concentração</i>	<i>Substância</i>	<i>Concentração</i>
FeCl <sub>3</sub> .4H <sub>2</sub> O	200 mg/L	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	50 mg/L
CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	200 mg/L	(NH <sub>4</sub> ) <sub>5</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O	90 mg/L
MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	500 mg/L	NiCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	50 mg/L
CuCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	30 mg/L	EDTA	1.000 mg/L
ZnCl <sub>2</sub>	50 mg/L	Resazurina	500 mg/L
Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	100/L	HCl	1 mL/L

#### 4.1.6. Métodos Analíticos

Visando conhecer as características dos substratos e do inóculo, foram realizadas análises físico-químicas. Avaliaram-se os parâmetros Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), Nitrogênio Amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e Carbono Orgânico Total (COT). As mesmas análises foram realizadas após a aplicação dos pré-tratamentos nas amostras de levedura residual e fase sólida. Todas as análises mencionadas foram executadas de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005)*.

Após a preparação dos frascos, conhecendo-se o volume real de cada componente adicionado, os parâmetros iniciais de maior interesse (DQO, ST e SV) foram calculados para cada condição. Posteriormente, ao final do experimento, os parâmetros medidos na caracterização inicial foram analisados novamente, a fim de avaliar o desenvolvimento da digestão anaeróbia.

Durante a realização dos ensaios, o volume de biogás produzido foi obtido indiretamente através da medição da pressão interna dos frascos, utilizando-se um manômetro (transmissor de pressão conectado a um regulador). A frequência de medição foi variável durante o ensaio, sendo que nos primeiros dias a pressão foi

medida diariamente e, posteriormente, de acordo com a diminuição da produção de biogás, aumentou-se o intervalo para 2, 3, 4 e 5 dias. Os ensaios totalizaram 30 dias, em média. O cálculo do volume foi realizado através da Equação Universal dos Gases Perfeitos, considerando que o número de mols não varia nas condições CNTP (condição 1) e a 35°C (condição 2), conforme apresentado na Equação 4.4:

$$\left( \frac{P_1 \times V_1}{n_1 \times R \times T_1} \right)_{CNTP} = \left( \frac{P_2 \times V_2}{n_2 \times R \times T_2} \right)_{35^\circ C} \rightarrow V_1 = \frac{P_2 \times V_2 \times T_1}{T_2 \times P_1} \quad (4.4)$$

Na qual:

P: Pressão (bar);

V: Volume de biogás (L);

n: número de mols de biogás produzido (moles);

R: constante universal dos gases;

T: temperatura (K).

A composição do biogás foi aferida coletando-se amostras do biogás presente no *headspace* dos frascos e analisando-as periodicamente por cromatografia gasosa (Varian CP-3800 CG TCD, usando hélio como gás carreador), seguindo a mesma frequência da medição de pressão. Esta análise somente não foi realizada quando após a estabilização da concentração de metano a produção de biogás observada foi baixa, não atingindo cerca de 250 mbar. Após cada análise de pressão e composição, os frascos foram despressurizados, deixando sempre uma pressão residual de aproximadamente 25 mbar, a fim de evitar a entrada de gases da atmosfera exterior para dentro dos frascos.

Deste modo, o volume de metano produzido foi calculado através da porcentagem de metano presente no frasco e do volume de biogás produzido, de acordo com a Equação 4.5.

$$V_{CH_4} = V_1 \times P_{CH_4} \quad (4.5)$$

Na qual:

$V_{CH_4}$  = Volume de metano produzido (L);

$V_1$  = Volume de biogás produzido (L);

$P_{CH_4}$  = Metano presente no frasco (%).

Os métodos utilizados para cada análise são apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Métodos analíticos utilizados**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>
<b>DQO</b>	Titulométrico com refluxo aberto
<b>ST</b>	Gravimétrico
<b>SV</b>	Gravimétrico
<b>NTK</b>	Titulométrico
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	Titulométrico
<b>Produção de biogás</b>	Manométrico
<b>Composição do biogás</b>	Cromatografia Gasosa

Vale destacar que devido às características dos substratos e do inóculo o método utilizado para a análise do parâmetro DQO foi o de Refluxo Aberto, que é mais adaptado para amostra com grande quantidade de sólidos. Neste método a amostra é adicionada em meio composto por ácido sulfúrico concentrado, sulfato de mercúrio (II), dicromato de potássio e um catalisador de prata. O meio é submetido à digestão por 2 horas a 150°C. Após a digestão, o dicromato reduzido é determinado por titulação com sulfato de amônia ferroso. O valor da DQO é então calculado pelo valor do dicromato reduzido a partir de uma curva padrão.

#### 4.1.7. Obtenção dos parâmetros cinéticos

Os parâmetros cinéticos foram obtidos através da Equação de Primeira Ordem, apresentada na Equação 4.6, na qual a hidrólise é considerada como etapa limitante (DONOSO-BRAVO *et al.*, 2010).

$$B = B_0 \times (1 - \exp(-k_h \times t)) \quad (4.6)$$

Na qual:

B = Produção de metano (mL/ gSV<sub>ad</sub>);

B<sub>0</sub> = Produção máxima de metano (mL/ gSV<sub>ad</sub>);

K<sub>h</sub> = Constante de hidrólise (d<sup>-1</sup>);

t = tempo (d).

Esta equação indica que a produção de metano possui crescimento exponencial, em função da capacidade máxima de produção de metano, do tempo e da constante de hidrólise. Segundo DONOSO-BRAVO *et al.*(2010) este último parâmetro cinético é crucial na degradação anaeróbia de sólidos, visto que a etapa de hidrólise pode se tornar uma etapa limitante no processo. Deste modo, este modelo de equacionamento foi utilizado adotando-se a premissa de que no processo de digestão anaeróbia de levedura residual de cervejaria a hidrólise é a etapa limitante.

Para o cálculo da Produção Máxima de Metano ou Extensão da Degradação ( $B_0$ ) e o Coeficiente de Hidrólise ( $k_h$ ) a equação foi aplicada à curva de produtividade de metano com relação aos SV adicionados (mL de metano/ g SV), utilizando-se o programa Excel<sup>®</sup> e sua função Solver. .

## **4.2. Estudo de caso**

A fim de analisar a viabilidade da geração de energia através do biogás produzido na digestão anaeróbia de levedura residual de cervejaria realizou-se um estudo de caso, no qual uma planta de geração de energia a partir de um digestor anaeróbio foi planejada. Este estudo de caso se dividiu em três etapas, sendo a primeira, a concepção do sistema de digestão anaeróbia e de aproveitamento do biogás para geração de energia, a segunda, o dimensionamento do sistema concebido e a terceira, a análise de viabilidade econômica da aplicação do sistema proposto em comparação com a aplicação da levedura residual como ração animal para ruminantes.

### *4.2.1. Concepção do sistema*

Para conceber o sistema de geração e aproveitamento do biogás analisaram-se as vantagens e desvantagens das principais tecnologias aplicadas atualmente tanto para a digestão do substrato quanto para a transformação do biogás em energia. As quais foram apresentadas, respectivamente, nos itens 3.4 e 3.5.

Foram levados em consideração fatores operacionais, econômicos e ambientais. Dentre os fatores operacionais analisados, destacam-se a complexidade de operação, a estabilidade, a aplicabilidade e a eficiência do sistema. Dentre os fatores econômicos analisou-se principalmente o custo, que é influenciado pelo tamanho das unidades, complexidade, eficiência e tempo de vida útil da tecnologia, entre inúmeros outros

fatores. Os principais fatores ambientais analisados para comparar as tecnologias foram a eficiência energética e a geração de poluentes.

A análise foi realizada de forma simplificada, com base em dados encontrados na literatura.

#### 4.2.2. *Dimensionamento do sistema*

O dimensionamento do sistema escolhido foi realizado de forma simplificada, apenas a fim de permitir a comparação econômica entre o aproveitamento da levedura residual para a geração de energia e sua utilização como ração animal. Para dimensionar o sistema seguiram-se os procedimentos indicados por PRATI (2010), os quais são apresentados a seguir.

- 1) Estimativa da quantidade de substrato: estimou-se com base em dados apresentados na literatura a produção de levedura residual para uma determinada capacidade de produção de cerveja;
- 2) Dimensionamento do digester: escolhido o tipo de digester a ser estudado, dimensionou-se esta unidade com base na estimativa de substrato estimada anteriormente e considerando a relação substrato/inóculo que obteve melhor desempenho na etapa experimental;
- 3) Estimativa da produção de biogás: estimou-se a produção de biogás com base nos dados de produção de biogás por DQO aplicada, obtidos na etapa experimental do estudo;
- 4) Estimativa da produção de lodo digerido: estimou-se a massa de lodo digerido com base na estimativa da digestão de SSV no digester;
- 5) Estimativa do potencial de produção de energia: o potencial de produção de energia foi estimado considerando a eficiência de conversão de biogás em energia da tecnologia escolhida.

#### 4.2.3. *Análise de viabilidade do sistema*

A análise de viabilidade econômica dos sistemas escolhidos foi realizada comparando a economia obtida no sistema de geração de energia utilizando biogás da digestão anaeróbia de levedura residual com o crédito gerado na utilização do mesmo substrato para a produção de ração animal. Para uma melhor comparação os custos e créditos foram expressos por unidade de volume de cerveja produzida.

Para isso, com relação à energia elétrica, analisou-se a tarifa de fornecimento de energia elétrica para as indústrias na região Sudeste do país, com base em dados de relatórios da ANEEL (2014), e estimou-se a economia que poderia ser obtida através do potencial de produção de energia elétrica do sistema de cogeração.

Com relação à energia térmica, analisou-se a substituição do gás natural utilizado nas caldeiras pelo biogás gerado na digestão anaeróbia, comparando-se o potencial de produção de energia térmica dos sistemas estudados com o do gás natural. Analisou-se o preço do gás natural para as indústrias no Brasil e adotou-se a média aplicada no estado de São Paulo, com base em dados fornecidos pela FIRJAN (2013). Em seguida estimou-se a economia que poderia ser obtida através da utilização da energia térmica gerada no sistema de aproveitamento de biogás.

Com relação ao uso da levedura residual para a produção de ração animal, considerou-se o preço de venda da levedura residual seca apresentado por ZANUTTO *et al.* (1999), o qual foi corrigido para o valor atual através do índice IGP-M. Também foram considerados os gastos com consumo de energia elétrica e térmica no processo de secagem, visto que segundo ZUNPANČIČ *et al.* (2012) o sistema possui alta demanda energética.

Deste modo, vale ressaltar que na comparação não foram considerados os custos de implantação e de operação dos processos analisados, com exceção aos custos de operação citados para produção da levedura residual.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Etapa experimental

#### 5.1.1. Etapa 1 – Comparação entre as relações substrato/inóculo (S/I)

A avaliação da melhor relação S/I para a levedura residual (LR) foi realizada analisando-se a produção líquida de biogás e metano e a produtividade de biogás e de metano com relação aos sólidos voláteis e à DQO aplicados. A Figura 5.1 apresenta os resultados obtidos relativos ao biogás e a Figura 5.2, os relativos ao metano.

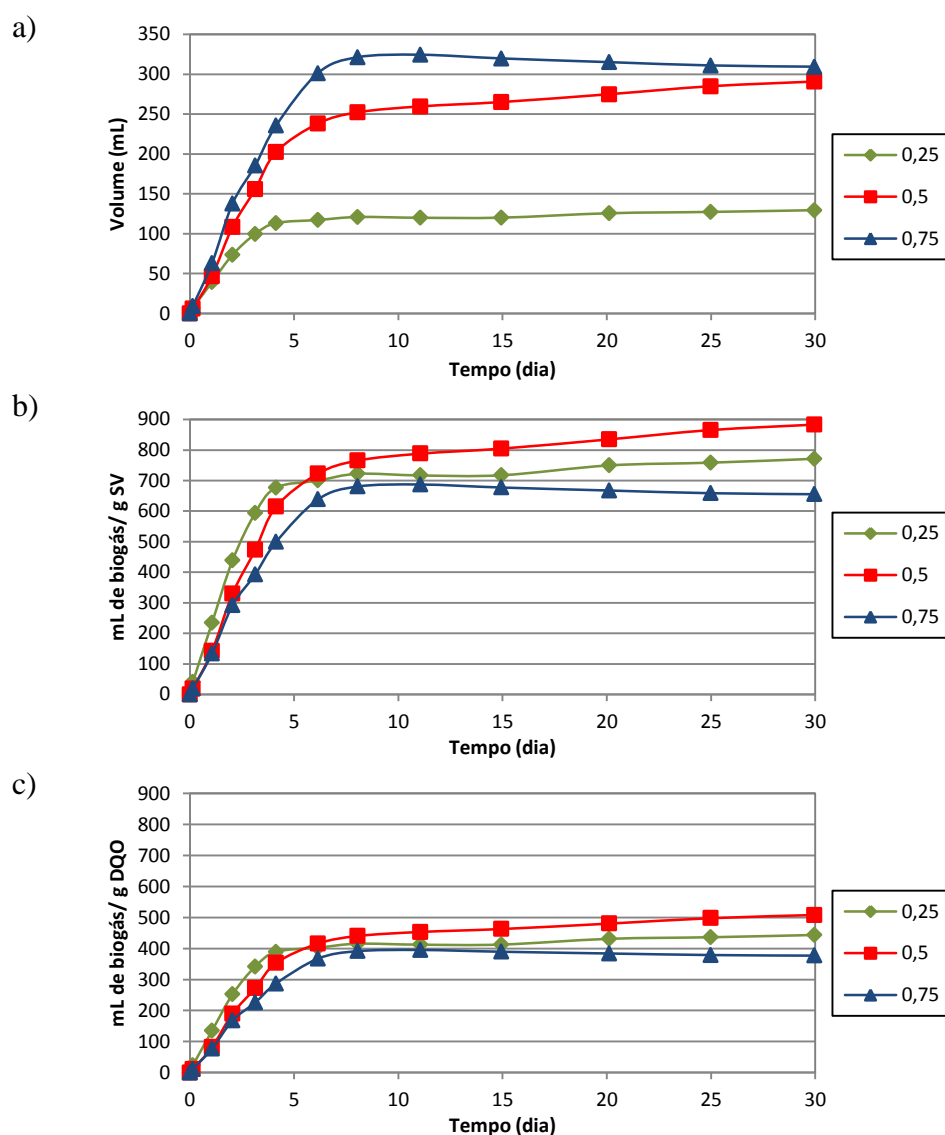
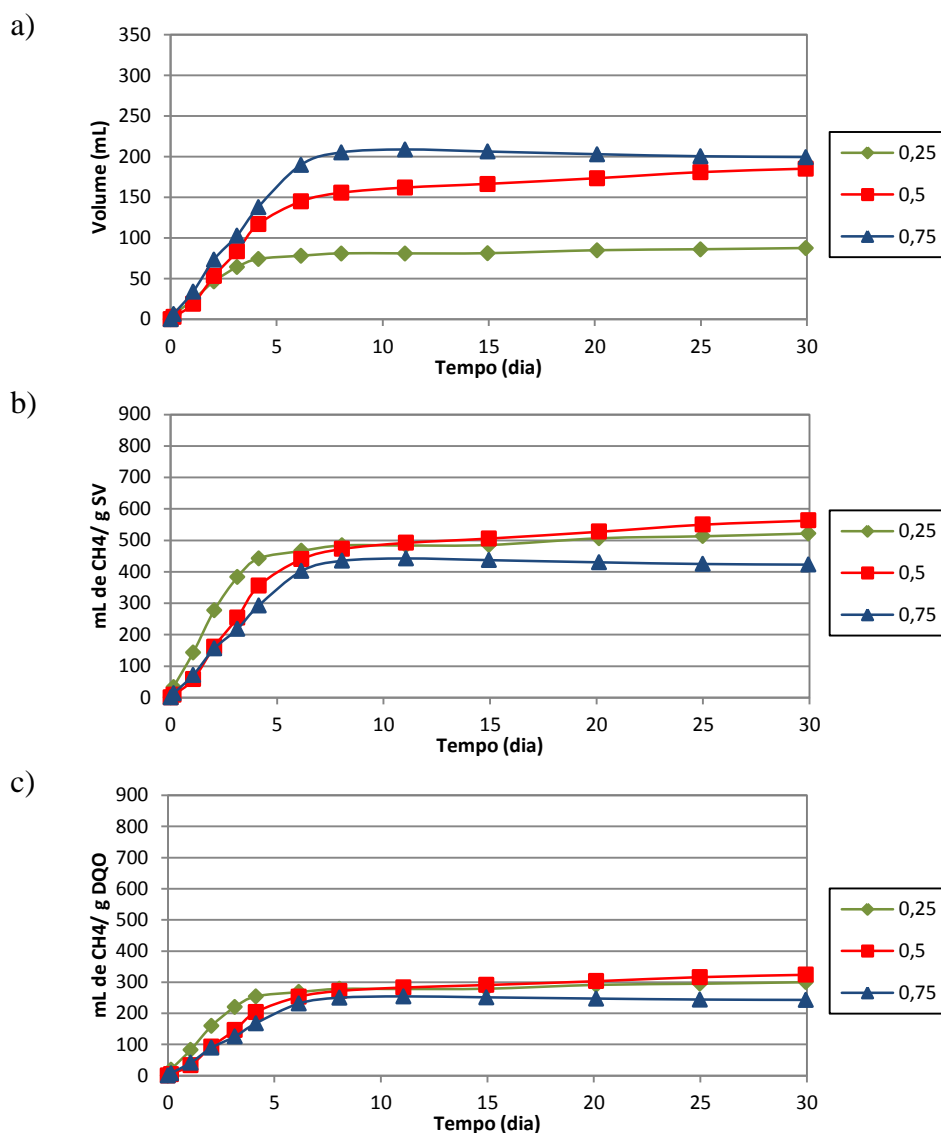


Figura 5.1 – Etapa 1: Produção e Produtividade de biogás.

a) Volume de biogás produzido, b) Produtividade de biogás relativa aos SV aplicados, c) Produtividade de biogás relativa à DQO aplicada.





**Figura 5.2 – Etapa 1: Produção e Produtividade de metano.**

a) Volume de metano produzido, b) Produtividade de metano relativa aos SV aplicados, c) Produtividade de metano relativa à DQO aplicada.

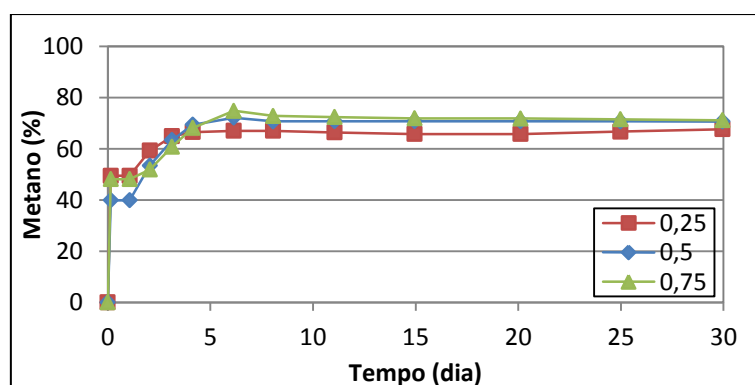
Analisando as curvas de produção de biogás e metano, verifica-se que em todas as condições um grande volume de gases foi gerado nos 6 primeiros dias do experimento, sendo que após, a produção estabilizou-se com o decorrer do tempo. Observa-se que a condição 0,75 g/g foi a que apresentou as maiores produções de biogás e de metano, produzindo, respectivamente,  $309 \pm 69$  mL de biogás e  $200 \pm 47$  mL de metano. Esta foi seguida da condição 0,5 g/g, que produziu  $291 \pm 5$  mL de biogás e  $185 \pm 5$  mL de metano. A condição 0,25 g/g apresentou os piores resultados, produzindo  $129 \pm 32$  mL de biogás e  $88 \pm 24$  mL de metano.

Avaliando a produtividade, verifica-se, entretanto, que a condição 0,75 g/g apresentou resultados abaixo das outras condições aplicadas, como pode ser observado nos itens b e c das Figuras 5.1 e 5.2, o que pode estar relacionado a efeitos inibitórios devido à maior quantidade de substrato nesta condição. Observa-se que inicialmente, nos primeiros cinco dias, a condição 0,25 g/g apresentou os melhores resultados com relação aos dois parâmetros analisados. Entretanto, a partir deste período a condição 0,50 g/g superou-a. Ao final do experimento, esta condição obteve as melhores produtividades, as quais foram:  $883 \pm 39$  mL de biogás/g  $SV_{ad}$ ,  $508 \pm 22$  mL de biogás/g  $DQO_{ad}$ ,  $563 \pm 29$  mL de metano/g  $SV_{ad}$  e  $324 \pm 16$  mL de metano/g  $DQO_{ad}$ . Em adição, esta condição também apresentou a melhor biodegradabilidade. Os resultados de biodegradabilidade obtidos para cada condição encontram-se na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 – Biodegradabilidades obtidas nas condições aplicadas na Etapa 1**

Condição	0,25	0,50	0,75
<b>Biodegradabilidade (%)</b>	85,76	92,49	69,48

Com relação à composição do biogás, apresentada na Figura 5.3, observa-se que a porcentagem de metano apresentou o mesmo padrão em todas as condições aplicadas e manteve-se relativamente constante a partir do oitavo dia de experimento. As composições finais não apresentaram diferença significativa, sendo que no 30º dia de experimento as porcentagens de metano obtidas foram: 68 % na condição 0,25 g/g, 71 % na condição 0,50 g/g e 71 % na condição 0,75 g/g.



**Figura 5.3 – Etapa1: Composição do biogás com relação ao metano**

Com base nos resultados obtidos, em especial a produtividade com relação à DQO adicionada e a biodegradabilidade, considerou-se que a melhor relação substrato/inóculo para a levedura residual foi a de 0,50 g/g, sendo esta aplicada subsequentemente nas outras etapas desta pesquisa.

### 5.1.2. Etapa 2 – Efeitos dos pré-tratamentos na composição dos substratos

#### Análises Físico-químicas

Para avaliar os efeitos dos pré-tratamentos na composição dos substratos, foram realizadas análises físico-químicas antes e após a aplicação dos pré-tratamentos. A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos.

O pré-tratamento térmico, devido a sua metodologia, realiza uma diluição do substrato, provocando redução no valor da concentração dos parâmetros analisados, o que torna difícil avaliar seus efeitos na solubilização de componentes. Verifica-se, através dos dados de ST antes e após o pré-tratamento, que esta diluição foi de, aproximadamente, 1:3 para a levedura residual e 1:4 para a fase sólida. Assim, analisando os outros parâmetros (exceto  $\text{N-NH}_4^+$ ) verifica-se uma redução que segue a mesma proporção (apresentando uma concentração entre 2,8 e 3,5 menor que o substrato sem pré-tratamento), permitindo concluir que não houve solubilização significativa.

Avaliando o pré-tratamento ultrassônico, verifica-se que não houve uma diferença considerável no valor dos parâmetros, ocorrendo uma variação de menos de 1% (exceto  $\text{N-NH}_4^+$ ). A fase sólida apresentou uma redução de 38% de DQO solúvel, entretanto, não foram identificados os motivos causadores desta diminuição. Deste modo, com base nos parâmetros analisados concluiu-se que este pré-tratamento também não obteve nenhum efeito significativo na solubilização de componentes.

Com relação ao nitrogênio amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), observa-se que com a aplicação dos pré-tratamentos ocorre uma redução considerável nos valores deste parâmetro. Nos substratos tratados com pré-tratamento térmico as reduções obtidas foram de 45% quando aplicado à levedura residual e 57% quando aplicado à fase sólida, considerando a diluição citada anteriormente. Nos substratos tratados com pré-tratamento ultrassônico, esta redução foi de 54% quando aplicado à levedura residual e 59% quando aplicado à fase sólida.

Tabela 5.2 – Etapa 2: Caracterização dos substratos antes e após pré-tratamentos

Parâmetros	Levedura Residual			Fase Sólida		
	<i>Sem pré-tratamento</i>	<i>Pré-tratamento térmico</i>	<i>Pré-tratamento ultrassônico</i>	<i>Sem pré-tratamento</i>	<i>Pré-tratamento térmico</i>	<i>Pré-tratamento ultrassônico</i>
DQO <sub>total</sub> (g/Kg)	278	79	288	370	81	379
DQO <sub>sólúvel</sub> (mg/L)	177.638	49.764	172.178	138.000	45.000	85.879
ST (g/Kg)	135,00	47,04	134,33	220,89	52,09	224,46
SV (g/Kg)	124,39	42,91	120,76	204,44	48,48	205,81
NTK (mg/Kg)	11.454,76	4.124,44	11.764,85	20.566,13	5.052,49	21.286,95
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/Kg)	2.603,79	476,42	1.063,03	3.977,81	429,04	1.818,14

### Análises de microscopia

Nas análises de microscopia realizadas utilizando a levedura residual, antes e após a aplicação dos pré-tratamentos, foi possível observar a modificação causada na estrutura física do substrato. Na amostra sem pré-tratamento havia a presença de uma grande quantidade de células de levedura vivas, as quais se movimentavam e distribuíam uniformemente, ocupando toda a placa. Observou-se apenas a presença de pequenos flocos (aglomerados) em alguns pontos.

Após a aplicação do pré-tratamento térmico observou-se que havia uma quantidade bastante reduzida de células de levedura, com a presença de muitos espaços vazios. Isto pode ter ocorrido devido ao acréscimo de água, ocasionado neste pré-tratamento, e ao rompimento das células de levedura. Verificou-se também a ausência de movimentação das leveduras, que ocorreu, possivelmente, pela morte destas devido à alta temperatura.

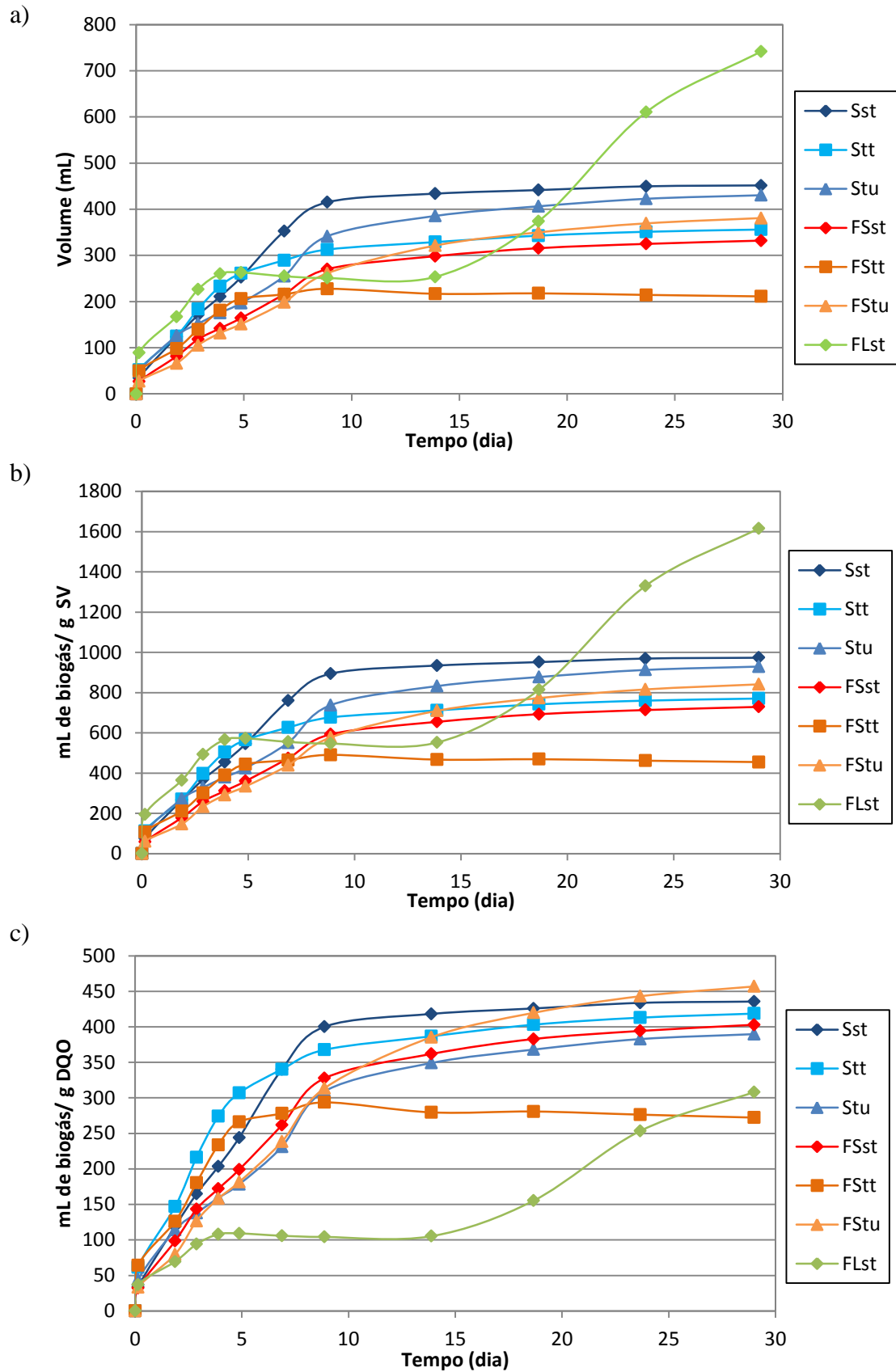
Na amostra analisada após o pré-tratamento ultrassônico, observou-se uma presença considerável de leveduras, mais do que a verificada no pré-tratamento térmico. Também se observou que estas ainda apresentavam uma pequena movimentação, o que permitiu concluir que ainda havia a presença de células vivas.

Verificou-se, deste modo, que os pré-tratamentos modificam as estruturas físicas do substrato. Entretanto, não foi possível através desta análise concluir qual pré-tratamento apresentou o melhor efeito no rompimento das células, devido à diluição ocasionada no pré-tratamento térmico. Infelizmente, o microscópio utilizado não possibilitava a captação de imagens, não sendo possível a apresentação de uma visualização mais concreta.

### *5.1.3. Etapa 3 – Efeitos dos pré-tratamentos e da separação de fases na produção de biogás*

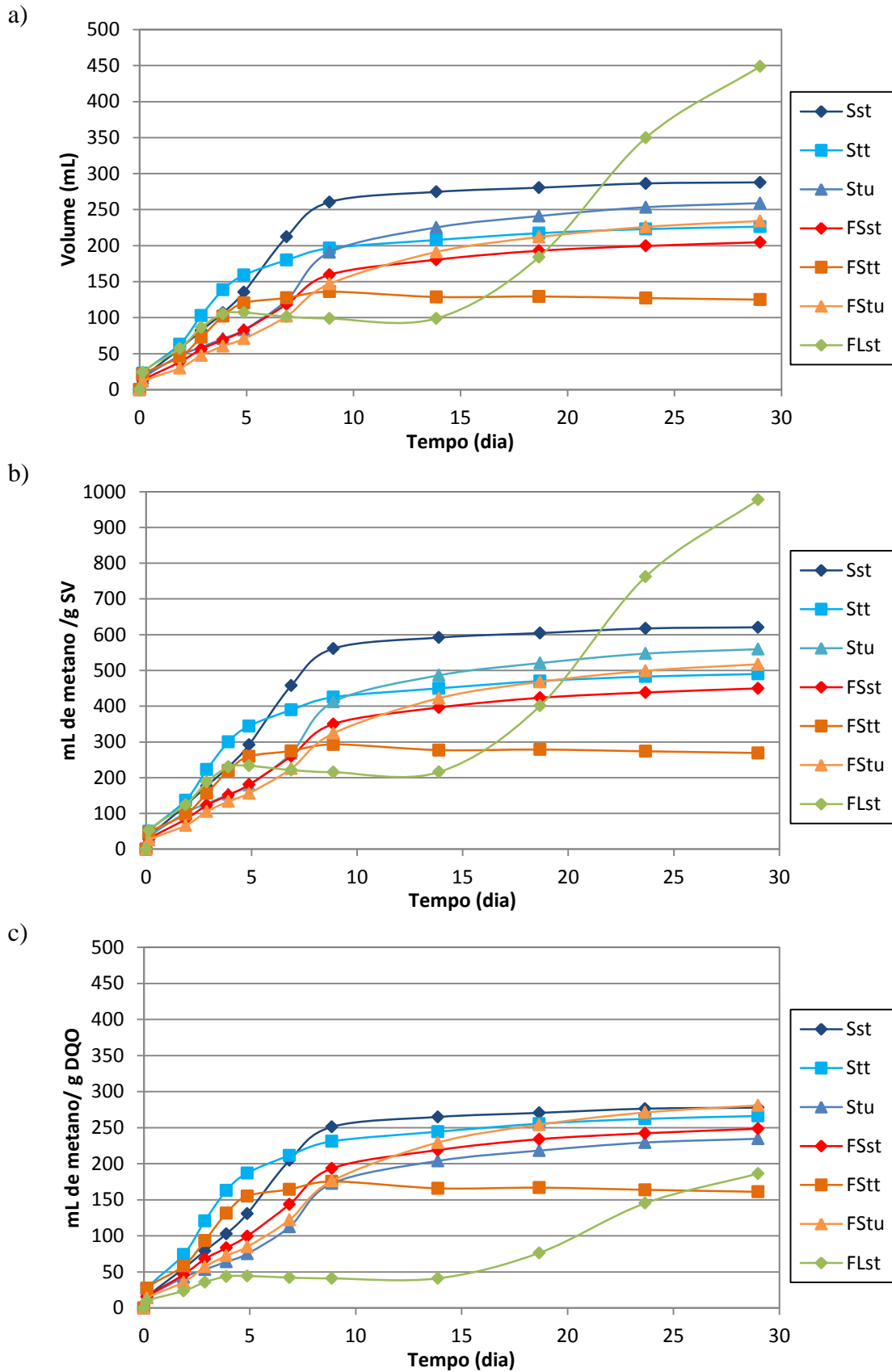
#### Produção de biogás e metano

Na terceira etapa, os ensaios BMP foram operados por 29 dias. Os resultados obtidos com relação ao biogás produzido são apresentados na Figura 5.4 e os com relação ao metano gerado, na Figura 5.5.



**Figura 5.4 – Etapa 3: Produção e Produtividade de biogás**

a) Volume de biogás produzido, b) Produtividade de biogás relativa aos SV aplicados, c) Produtividade de biogás relativa à DQO aplicada.



**Figura 5.5 – Etapa 3: Produção e Produtividade de metano**

a) Volume de biogás produzido, b) Produtividade de biogás relativa aos SV aplicados, c) Produtividade de biogás relativa à DQO aplicada.

Observa-se que as produções volumétricas (item a), tanto de biogás quanto de metano, podem ser divididas em três etapas: uma etapa inicial, que abrange os primeiros cinco dias de experimento, uma etapa intermediária, composta pelo período do dia cinco ao dia quinze, e uma etapa final, que abrange do dia quinze ao dia trinta.

Na etapa inicial, analisando a produção de biogás, observa-se que o melhor resultado é obtido pela Fase Líquida, seguida pela Fase Mista e pela Fase Sólida. Este comportamento, já era esperado, uma vez que a Fase Líquida possui a tendência de apresentar substâncias solubilizadas, que são mais facilmente biodegradáveis. Em adição, analisando a produção de metano, verifica-se que a Fase Mista apresenta uma produção semelhante à Fase Líquida, enquanto que a Fase Sólida apresenta uma produção mais baixa. Isto reafirma que a parcela facilmente biodegradável, que pode chegar à fase metanogênica mais rapidamente, está presente na Fase Líquida. No caso, a produção inicial obtida pela Fase Mista corresponde à produção relativa à fase líquida presente nesta.

Analisando o efeito dos pré-tratamentos na etapa inicial, observa-se que o pré-tratamento térmico apresentou as melhores produções iniciais de biogás e de metano para ambos os substratos, sendo este resultado mais visível na produção de metano. Isto indica que este tipo de pré-tratamento acelerou o início da etapa metanogênica. Verifica-se, por exemplo, que a produção de metano da Fase Sólida com pré-tratamento térmico é semelhante a da Fase Mista sem pré-tratamento. Por outro lado, tem-se que o pré-tratamento ultrassônico apresentou os piores resultados iniciais, sendo estes mais baixos que os obtidos pelos substratos sem pré-tratamento. Este comportamento representa que algum tipo de inibição é causado devido a este pré-tratamento.

Na etapa intermediária, as condições FLst , Stt e FStt apresentaram uma estabilização na produção de biogás e de metano. Em contrapartida, as outras condições continuaram apresentando curvas com tendência de crescimento até o décimo dia, a partir do qual, também iniciaram um processo de estabilização da produção. Observa-se neste período que as produções dos substratos sem pré-tratamento e com pré-tratamento ultrassônico superam o volume produzido pelos substratos pré-tratados termicamente, que na primeira etapa apresentaram os melhores resultados.

Na última etapa, verifica-se que todas as condições apresentaram tendência de estabilização da produção de biogás e de metano, com exceção da Fase Líquida. Esta condição apresentou um grande aumento na geração de biogás e de metano e ao final do experimento obteve as melhores produções volumétricas, cujos valores podem ser



observados na Tabela 5.3. Este comportamento é característico da presença de dois tipos de substratos distintos, um facilmente biodegradável e outro dificilmente biodegradável. Deste modo, as hipóteses propostas para explicar a não ocorrência deste comportamento na Fase Mista são de que esta apresente compostos com tempo de degradação intermediária, impossibilitando a percepção do patamar intermediário, ou de que a segunda fase de produção não pode ser observada durante o período analisado. Em adição, o maior volume de gases foi obtido nesta condição porque esta apresentava uma maior DQO e, conseqüentemente, um maior potencial de produção de metano.

Analisando as produtividades, observa-se que com a relação aos SV aplicados obtêm-se curvas com o mesmo comportamento apresentado pela produção volumétrica. Isto ocorreu porque todas as condições apresentavam aproximadamente a mesma quantidade de sólidos voláteis (entre 12,2 e 13,4 g SV). Entretanto, analisando a produtividade com relação à DQO adicionada, observa-se um comportamento um pouco distinto. A principal diferença é observada na Fase Líquida. Esta apresentou a melhor produção volumétrica, entretanto, a produtividade com relação à DQO adicionada foi a segunda mais baixa. Isto ocorreu porque esta condição possuía uma maior DQO, devido ao método de definição das condições (relação S/I) que levava em conta a quantidade de SV presentes.

Além disto, pode-se observar claramente que os pré-tratamentos térmicos apresentaram inicialmente uma degradação mais rápida, mas ao final não demonstraram produtividades melhores que as condições sem pré-tratamento. Com relação ao pré-tratamento térmico, observa-se que as produtividades foram mais baixas na fase inicial, entretanto ao final do experimento foram obtidos resultados satisfatórios para a Fase Sólida.

Deste modo, analisando os resultados de produção e produtividade de biogás e metano obtidos, verifica-se que os pré-tratamentos térmicos possuem maior efetividade na produção inicial, entretanto, não aumentam a produtividade final. No caso da FStt observou-se uma grande diminuição deste parâmetro quando comparada com a condição sem pré-tratamento, que pode ter sido ocasionada devido a algum tipo de inibição. Já com relação ao pré-tratamento ultrassônico, observa-se que este foi mais adequado para fase sólida, uma vez que mostrou uma diminuição do volume produzido quando aplicado ao substrato levedura residual.

Tabela 5.3 – Etapa 3: Produção e Produtividade de Biogás e de Metano

<i>Condição</i>	<b>Biogás</b>			<b>Metano</b>		
	<i>Volume</i>	<i>Produtividade</i>		<i>Volume</i>	<i>Produtividade</i>	
	<i>(mL)</i>	<i>(mL/g SV)</i>	<i>(mL/g DQO)</i>	<i>(mL)</i>	<i>(mL/g SV)</i>	<i>(mL/g DQO)</i>
Sst	452 ± 40	973 ± 101	436 ± 45	288 ± 32	620 ± 77	278 ± 35
Stt	356 ± 11	771 ± 25	419 ± 14	226 ± 8	490 ± 17	266 ± 9
Stu	430 ± 13	929 ± 14	390 ± 6	259 ± 11	559 ± 16	235 ± 7
FSst	332 ± 43	729 ± 111	403 ± 61	205 ± 30	450 ± 76	248 ± 42
FStt	211 ± 37	455 ± 73	272 ± 44	125 ± 26	269 ± 53	161 ± 32
FStu	381 ± 1	841 ± 1	457 ± 1	234 ± 0	517 ± 0	281 ± 0
FLst	742 ± 93	1617 ± 202	308 ± 38	449 ± 65	978 ± 142	186 ± 27

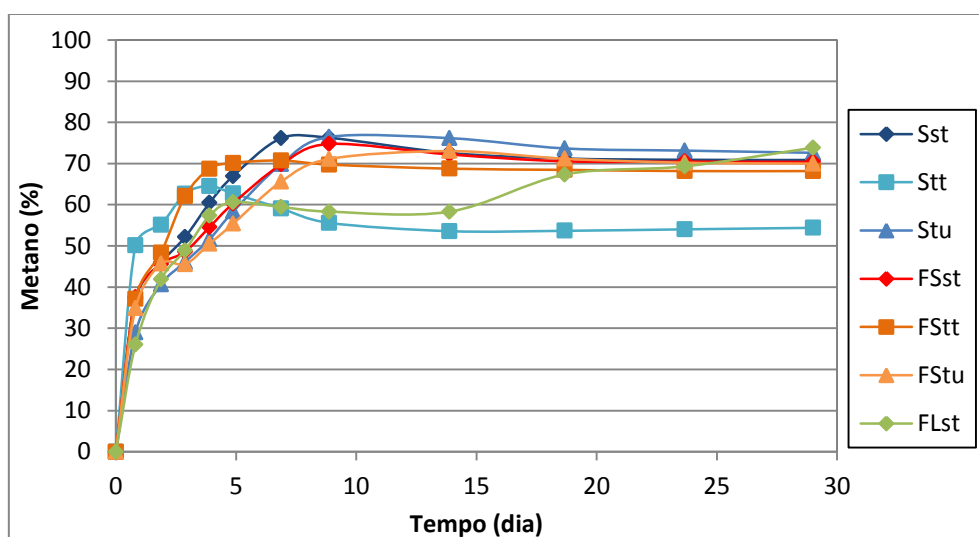
Assim, tem-se de forma geral que os pré-tratamentos não obtiveram grandes melhorias da produção de metano. Isto pode ser justificado devido à alta biodegradabilidade apresentada pelos substratos sem pré-tratamento, como pode ser observado na Tabela 5.4, o que torna difícil grandes avanços neste ponto.

**Tabela 5.4 – Biodegradabilidades obtidas nas condições aplicadas na Etapa 3**

Condição	Sst	Stt	Stu	FSst	FStt	FStu	FLst
Biodegradabilidade (%)	79	76	67	71	46	80	53

### Composição do biogás

Analisando a composição do biogás com relação ao metano, apresentada na Figura 5.6, observa-se que os substratos aos quais foi aplicado o pré-tratamento térmico apresentaram inicialmente maiores concentrações de metano, enquanto que os que foram tratados com pré-tratamento ultrassônico apresentaram as concentrações mais baixas, com resultados semelhantes à FLst. Entretanto, as outras condições obtiveram um crescente aumento da concentração de metano com o decorrer do tempo, enquanto que a partir do quinto dia as condições Stt e FStt se estabilizaram. Em geral, as concentrações das outras condições se estabilizaram a partir do vigésimo dia.



**Figura 5.6 – Etapa 3: Composição do biogás com relação ao metano**

Ao final do experimento todas as condições apresentaram concentrações de metano próximas, em torno dos 71%. Faz-se exceção a condição Stt, que obteve uma concentração final bastante mais baixa, de 54%.

Assim, conclui-se que o pré-tratamento térmico auxilia a aceleração da produção de metano inicial; entretanto, não possui ação satisfatória na manutenção desta produção no decorrer do tempo, provavelmente por efeitos inibitórios, diminuindo as concentrações deste composto no biogás. Com relação ao tratamento ultrassônico, verifica-se que este não possui nenhuma ação na concentração de metano no biogás produzido.

#### Parâmetros cinéticos

O modelo cinético de Primeira Ordem foi aplicado aos dados experimentais de produtividade de metano por SV adicionados. Na Figura 5.7 são apresentadas as curvas cinéticas obtidas e na Tabela 5.5 encontram-se os parâmetros cinéticos calculados.

Observa-se, através das curvas obtidas (linhas contínuas), que o modelo apresentou um bom ajuste aos dados experimentais de todas as condições, com exceção à condição FLst. Esta mostrou um padrão bastante diferente dos obtidos nas outras condições, apresentando uma rápida degradação inicial, uma fase de estabilização e logo outra fase de grande degradação, característica da presença de dois tipos de substratos. Portanto, devido a não adequação do modelo de primeira ordem, esta condição não foi avaliada com relação aos parâmetros cinéticos obtidos, por isso seus resultados não serão apresentados.

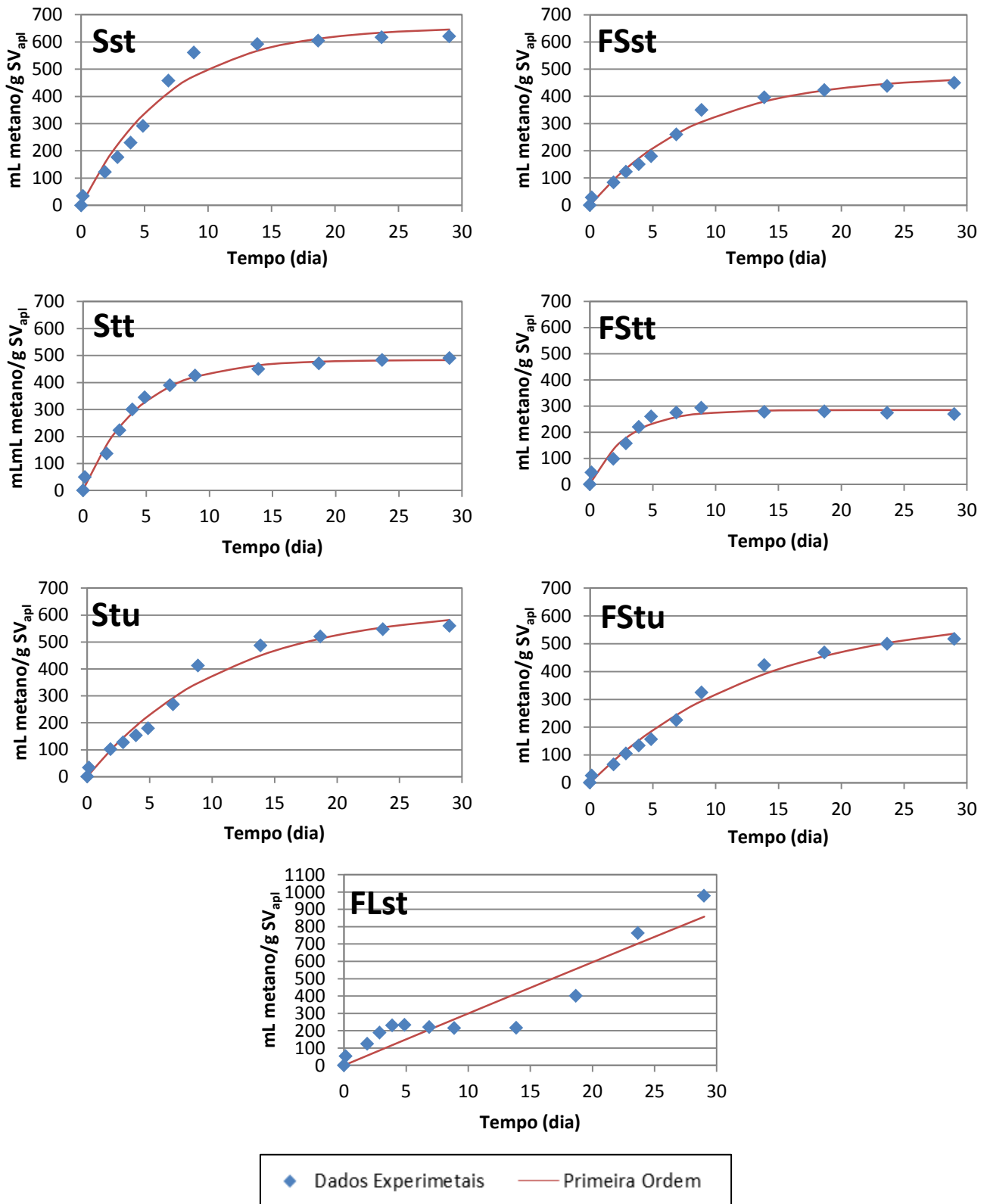


Figura 5.7 – Etapa 3: Curvas do Modelo Cinético de Primeira Ordem

Tabela 5.5 – Etapa 3: Parâmetros Cinéticos

Condição	$B_0$ (mL/gVS <sub>fed</sub> )	$k_h$ (d <sup>-1</sup> )
Sst	655,59	0,14
Stt	483,59	0,23
Stu	625,76	0,09
FSst	477,07	0,12
FStt	284,74	0,34
Fstu	605,66	0,07

Através dos parâmetros cinéticos obtidos, comprovam-se numericamente os fatos observados no subtópico “Produção de Biogás e de Metano” sobre o efeito dos pré-tratamentos na digestão anaeróbia dos substratos. Verifica-se que o pré-tratamento térmico acelera a cinética de produção, pois estas condições apresentam as maiores constantes de hidrólise ( $k_h$ ). Em contrapartida, este tipo de pré-tratamento reduz a produção de metano ( $B_0$ ). Este resultado pode ser devido à ocorrência de algum tipo de inibição, como, por exemplo, uma inibição por amônia, que costuma ocorrer após este tipo de pré-tratamento em alguns substratos.

Também se verifica que o pré-tratamento ultrassônico apresenta a pior cinética de degradação, mostrando um atraso na produção inicial. Entretanto, com relação à produção de metano este pré-tratamento apresentou diferentes comportamentos, diminuindo em 5% a produção do substrato levedura residual quando comparado com o substrato sem pré-tratamento e aumentando em 27% a produção da fase sólida. Portanto, verifica-se que o pré-tratamento ultrassônico somente produz resultados positivos quando aplicado a substratos com maior concentração de sólidos. Entretanto, este aumento deve ser analisado para definir se energeticamente sua aplicação é viável.

#### Remoção de componentes

Na Tabela 5.6 são apresentadas as concentrações iniciais e finais dos parâmetros DQO, ST, SV e NTK e as respectivas remoções obtidas.

Analisando o parâmetro DQO, observa-se que, devido as diferentes concentrações dos substratos, as concentrações iniciais de cada condição foram diferentes. Verifica-se também que para cada substrato essa diferença é maior com

relação à condição com pré-tratamento térmico, pois durante o pré-tratamento o substrato sofreu diluição, apresentando valores mais baixos de DQO. A fase líquida foi a condição que apresentou a maior DQO inicial, isto se deve ao fato de que as condições foram definidas a partir da relação S/I, que considerou os SV como parâmetro base. Como a fase líquida possuía a menor concentração de sólidos, foi necessário adicionar maior quantidade de substrato, ocasionando o maior valor deste parâmetro.

Com relação à remoção, observa-se que os melhores resultados foram obtidos pelo substrato Fase Mista, seguido pela Fase Sólida, apresentando a Fase Líquida os piores resultados. Avaliando os pré-tratamentos tem-se que em ambos os substratos o pré-tratamento ultrassônico apresentou resultados semelhantes à condição sem pré-tratamento, entretanto, o pré-tratamento térmico apresentou resultados inferiores. Este resultado está de acordo com a produção de metano observada em cada condição.

**Tabela 5.6 – Etapa 3: Remoção de DQO, ST, SV e NTK**

<b>Parâmetro</b>	<b>Branco</b>	<b>Sst</b>	<b>Stt</b>	<b>Stu</b>	<b>FSst</b>	<b>FStt</b>	<b>FStu</b>	<b>FLst</b>
DQO <sub>i</sub> (g/Kg)	14,00	23,50	20,32	24,11	21,78	19,85	21,86	33,22
DQO <sub>f</sub> (g/Kg)	10,52	10,95	10,39	10,95	11,34	10,72	15,05	20,25
Remoção (%)	25	53	49	54	48	46	47	39
ST <sub>i</sub> (g/Kg)	15,68	19,97	18,73	20,06	20,16	18,86	20,74	18,51
ST <sub>f</sub> (g/Kg)	16,13	16,51	15,54	16,66	16,99	15,79	17,03	18,16
Remoção (%)	-3	17	17	17	16	16	27	2
SV <sub>i</sub> (g/Kg)	13,77	13,32	12,45	13,29	13,44	12,60	13,40	12,19
SV <sub>f</sub> (g/Kg)	7,35	7,55	7,27	7,78	7,93	7,25	7,74	9,88
Remoção (%)	80	43	61	41	41	42	50	19
NTK <sub>i</sub> (mg/L)	1416,57	1777,84	1679,78	1798,49	1834,90	1734,03	1844,31	1437,35
NTK <sub>f</sub> (mg/L)	1255,25	1684,63	1557,02	1635,77	1750,64	1584,40	1744,74	1349,84
Remoção (%)	11	5	7	9	5	8	5	6

Como as condições foram definidas a partir da relação S/I, verifica-se que as variações nas concentrações iniciais de ST e SV são menores, visto que todos os substratos apresentavam uma relação de SV/ST de cerca de 0,92. Faz-se exceção ao branco, pois para o inóculo esta relação era de 0,58.

Com relação à remoção de sólidos observa-se que a fase líquida apresentou resultados bastante abaixo das outras condições tanto para SV quanto para ST. No

substrato levedura residual observa-se que os pré-tratamentos não obtiveram influência na remoção de ST, pois os resultados foram semelhantes à condição sem pré-tratamento. Entretanto, na remoção de SV, o pré-tratamento térmico obteve o melhor resultado, removendo cerca de 20% a mais que as outras condições. Já no substrato fase sólida, observa-se que para ambos os parâmetros os pré-tratamentos não apresentaram variações consideráveis quando comparados à condição sem pré-tratamento.

Analisando o parâmetro NTK, observa-se que as concentrações iniciais são altas e que não houve uma grande variação destas de uma condição para outra. Com relação à remoção, observa-se que os resultados obtidos foram bastante baixos e que não houve influência significativa dos pré-tratamentos neste parâmetro. Com base nestes resultados, tem-se que o processo gera um sub-produto com grande quantidade de nitrogênio. Assim, pode-se sugerir uma análise da utilização do lodo gerado na digestão anaeróbia como fertilizante orgânico.

Deste modo, analisando as remoções de forma geral tem-se que, comparando os substratos, a Fase Mista apresenta resultados um pouco superiores ao das outras condições. Em adição, comparando os pré-tratamentos tem-se que, embora alguns resultados tenham sido superiores as condições sem pré-tratamento, não houve diferenças significativas que justifiquem a aplicação dos pré-tratamentos testados com a finalidade de aumentar as remoções.

### *Síntese dos Resultados*

A fim de facilitar a visualização e a compreensão dos efeitos da separação de fases e dos pré-tratamentos na composição dos substratos e na digestão anaeróbia (etapas 2 e 3), apresenta-se na Tabela 5.7 um resumo dos resultados obtidos, que descreve e compara os principais resultados obtidos por cada condição analisada.



Tabela 5.7 – Síntese dos resultados obtidos na etapa experimental

Substrato	Pré-tratamento	S/I	Efeito dos pré-tratamentos na composição do substrato			Efeitos dos pré-tratamentos e da separação de fases na produção de biogás e metano				
			Características Físico-Químicas	Solubilização de componentes	Estrutura Física do substrato	Produção de biogás e metano	Biodegradabilidade	Composição do biogás	Cinética de produção	Remoção de Componentes
Levedura Residual (LR)	Nenhum	0,25	-	-	Grande quantidade de células vivas, com movimentação	Produção inicial rápida e alta produção final, maior que a obtida para o substrato FS	Alta biodegradabilidade (a maior dentre todas as condições analisadas)	Alta concentração final de metano	Constante de hidrólise mediana e alta produção de biogás (a maior dentre todas as condições analisadas)	Média remoção de DQO e de SV / Baixa remoção de ST e de NTK
	Térmico	0,25	Redução no valor da concentração dos parâmetros analisados	Sem efeito significativo	Grande redução da quantidade de células e em sua movimentação	Produção inicial mais rápida, porém produção final menor que a condição sem pré-tratamento	Alta biodegradabilidade, porém abaixo da condição sem pré-tratamento	Maior concentração de metano na fase inicial, porém concentração final bastante abaixo da condição sem pré-tratamento	Constante de hidrólise alta e baixa produção de biogás com relação a condição sem pré-tratamento	Média remoção de DQO e de SV / Baixa remoção de ST e de NTK
	Ultrassônico	0,25	Sem efeito significativo	Sem efeito significativo	Pequena redução da quantidade de células e em sua movimentação	Produção inicial mais lenta e produção final semelhante à condição sem pré-tratamento	Alta biodegradabilidade, porém abaixo da condição sem pré-tratamento	Menor concentração de metano na fase inicial e concentração final semelhante a condição sem pré-tratamento	Constante de hidrólise baixa e produção de biogás mediana com relação a condição sem pré-tratamento	Média remoção de DQO e de SV / Baixa remoção de ST e de NTK
Fase Sólida (FS)	Nenhum	0,25	-	-	Grande quantidade de células vivas, com movimentação.	Produção inicial rápida, porém produção final menor que a do substrato LR e a da condição com pré-tratamento térmico	Alta biodegradabilidade, porém menor que do substrato LR	Alta concentração final de metano.	Constante de hidrólise mediana, semelhante a obtida para a LR, e produção de biogás mediana	Média remoção de DQO e de SV / Baixa remoção de ST e de NTK
	Térmico	0,25	Redução no valor da concentração dos parâmetros analisados	Sem efeito significativo	Grande redução da quantidade de células e em sua movimentação	Produção inicial mais rápida, porém produção final bastante abaixo da apresentada pela condição sem pré-tratamento	Média biodegradabilidade, bastante abaixo da condição sem pré-tratamento	Maior concentração de metano na fase inicial e concentração final semelhante a condição sem pré-tratamento	Constante de hidrólise alta e produção de biogás bastante abaixo da condição sem pré-tratamento	Média remoção de DQO e de SV / Baixa remoção de ST e de NTK
	Ultrassônico	0,25	Sem efeito significativo	Sem efeito significativo	Pequena redução da quantidade de células e em sua movimentação	Produção inicial mais lenta, porém produção final maior que a apresentada pela condição sem pré-tratamento	Alta biodegradabilidade, acima da condição sem pré-tratamento	Menor concentração de metano na fase inicial e concentração final semelhante a condição sem pré-tratamento	Constante de hidrólise baixa e alta produção de biogás com relação a condição sem pré-tratamento	Média remoção de DQO e de SV / Baixa remoção de ST e de NTK
Fase Líquida (FL)	Nenhum	0,25	-	-	-	Rápida degradação inicial, seguida de etapa de estabilidade e, logo, de outra fase de grande degradação	Média biodegradabilidade, abaixo dos substratos LR e FS sem tratamento	Menor concentração de metano na fase inicial e concentração final semelhante a condição sem pré-tratamento	Não se adequou ao modelo de Primeira Ordem	Baixas remoções com relação a todos os parâmetros

## 5.2. Estudo de caso

### 5.2.1. Concepção do sistema

Para o sistema de digestão anaeróbia selecionou-se o digestor anaeróbio de um estágio e alta taxa, operando em fluxo contínuo, com sistema em mistura completa. Optou-se por esta tecnologia, porque dentre as mais utilizadas esta é a que apresenta maior estabilidade no processo, volume reduzido, menor tempo de detenção e simplicidade operacional.

Para o aproveitamento de biogás foram selecionados dois sistemas: o sistema de cogeração de energia, que produz energia elétrica e térmica, e o sistema de geração de energia térmica através de caldeiras. O primeiro sistema foi escolhido porque se verificou que nas cervejarias o consumo de energia se dá principalmente através de calor de processo, na forma de vapor, e de energia elétrica (SANTOS E RIBEIRO, 2005). Desta forma, inicialmente, este sistema poderia atender com uma única fonte primária as necessidades de energia térmica, na forma de vapor, e de energia elétrica. O segundo sistema foi escolhido a fim de avaliar qual a melhor aplicação para o biogás produzido, uma vez que a energia térmica também é uma necessidade nas cervejarias e a cogeração de energia pode ser economicamente desfavorável.

As tecnologias analisadas para realizar a cogeração de energia foram a microturbina e o motor de combustão interna. Para a escolha considerou-se a eficiência na geração de energia, os custos e os fatores ambientais, visando desenvolver um sistema ambientalmente correto e competitivo. A microturbina é ambientalmente melhor que o motor de combustão interna, pois gera menos poluição atmosférica, entretanto, apresenta menor eficiência e custos mais elevados, além de um menor tempo de vida útil. Deste modo, optou-se pela tecnologia de motor de combustão interna, a qual pode ter suas emissões atmosféricas controladas.

O objetivo do estudo de caso foi avaliar a viabilidade da produção de energia através do aproveitamento do biogás produzido na digestão anaeróbia da levedura residual de cervejaria, comparando-a com a aplicação deste substrato na produção de ração animal para ruminantes. Deste modo, a Figura 5.8 apresenta um fluxograma simplificado das aplicações da levedura residual avaliadas no estudo de caso.

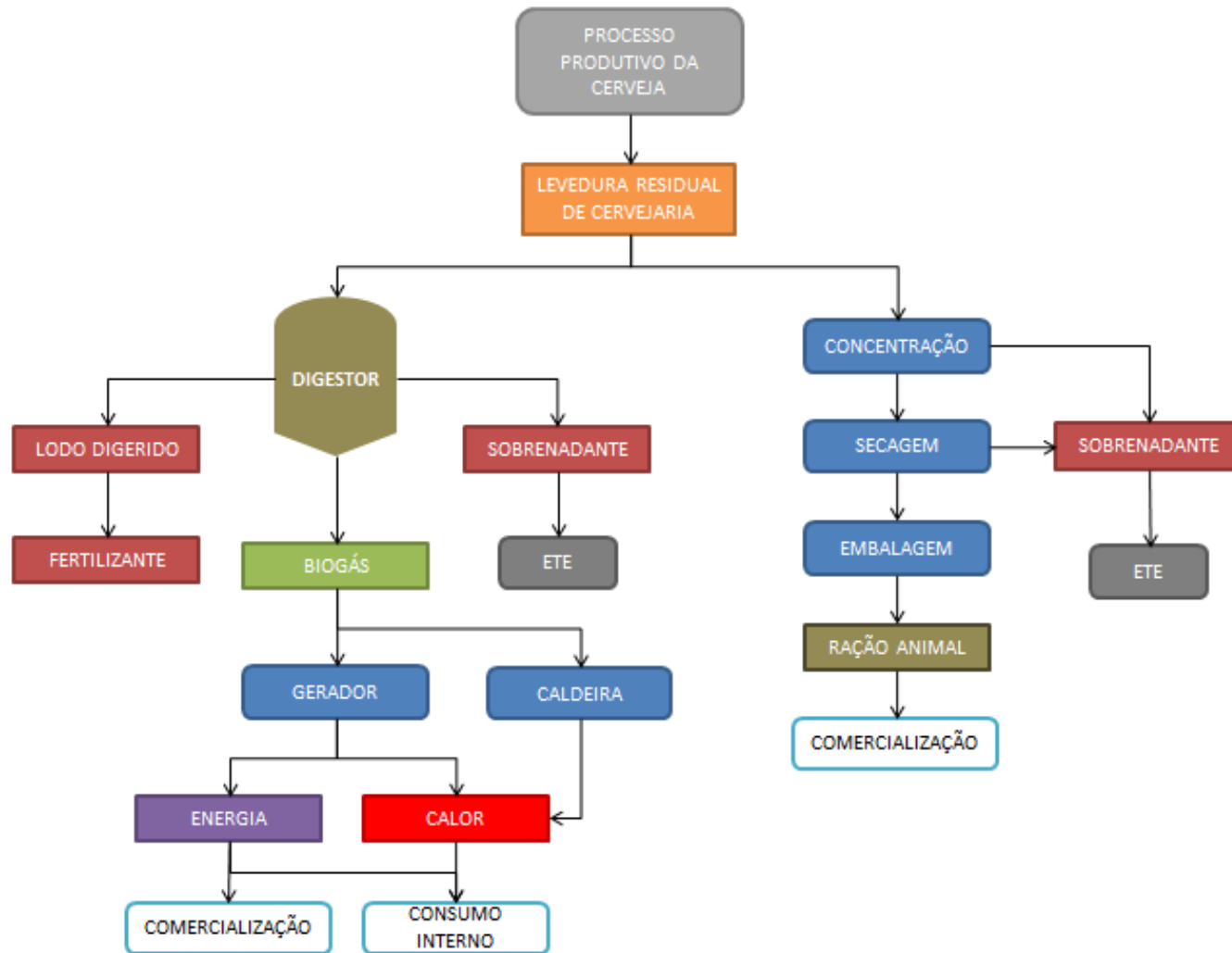


Figura 5.8 – Sistemas de aproveitamento da levedura residual de cervejaria abordadas no estudo caso

### 5.2.2. Dimensionamento do sistema

O sistema de aproveitamento da levedura residual de cervejaria através da geração de energia utilizando o biogás produzido na digestão anaeróbia foi dimensionado para uma cervejaria hipotética de grande porte, cuja produção de cerveja adotada foi de 170.000 hL/mês.

Vale ressaltar que os cálculos foram realizados para uma estimativa preliminar da potencialidade de produção de energia através da levedura residual do processo de produção de cerveja e que considerações mais aprofundadas seriam necessárias para um estudo real.

Com base na literatura consultada e nos resultados obtidos na etapa experimental do trabalho, foram adotados os seguintes parâmetros de projeto:

- Capacidade de produção de cerveja ( $Q_c$ ): 170.000 hL de cerveja/mês;
- Taxa de produção de levedura residual (TPLR): 3 L de levedura residual/L de cerveja (SANTOS E RIBEIRO, 2005);
- Concentração de DQO na levedura residual ( $DQO_{LR}$ ): 270 g DQO/L;
- Concentração de SST na levedura residual ( $SST_{LR}$ ): 150 g SST/L;
- Concentração de SSV na levedura residual ( $SSV_{LR}$ ): 135 g SSV/L;
- Tempo de detenção no digestor anaeróbio (TDH): 20 dias;
- Relação substrato/inóculo no digestor anaeróbio (S/I): 0,5 gSSV/gSSV;
- Eficiência de redução de SSV ( $E_{SSV}$ ): 45% (JORDÃO E PESSÔA, 2011);
- Taxa de produção de biogás (TPB): 460 mL biogás/g DQO aplicada;
- Poder calorífico do biogás (PCB): 5.500 kcal/m<sup>3</sup>;
- Eficiência de aproveitamento da energia térmica no motor a combustão ( $E_{ETM}$ ): 45% (JORDÃO E PESSÔA, 2011);
- Eficiência de aproveitamento da energia elétrica no motor a combustão ( $E_{EEM}$ ): 30% (JORDÃO E PESSÔA, 2011);
- Eficiência de aproveitamento da energia térmica do biogás na caldeira ( $E_{ETC}$ ): 75% (JORDÃO E PESSÔA, 2011);
- Taxa de consumo de energia térmica na cervejaria ( $TCET_c$ ): 175 MJ/hL de cerveja produzida (SANTOS E RIBEIRO, 2005);
- Taxa de consumo de energia elétrica na cervejaria ( $TCEE_c$ ): 10 kWh/hL de cerveja produzida (SANTOS E RIBEIRO, 2005).

A seguir é apresentado o memorial de cálculo do dimensionamento.

### Estimativa da quantidade de substrato

A estimativa da vazão de levedura residual produzida na cervejaria ( $Q_{LR}$ ) foi realizada considerando-se a taxa de produção de levedura residual e a produção de cerveja adotada. O cálculo é apresentado a seguir.

$$Q_{LR} = Q_c \times TPLR = 170.000 \times 3 = 510.000 \text{ L/mês}$$

Onde:

$Q_{LR}$ : Vazão de levedura residual produzida (L/mês);

$Q_c$ : Capacidade de produção de cerveja (hL/mês);

TPLR: Taxa de produção de levedura residual (L levedura/hL de cerveja).

### Dimensionamento do digestor

Dimensionou-se um digestor de fluxo contínuo e mistura completa, onde o tempo de detenção hidráulica é igual ao tempo de detenção celular. Para isso, primeiramente, calcularam-se as cargas de DQO ( $CDQO_a$ ), de SST ( $CSST_a$ ) e de SSV ( $CSSV_a$ ) afluentes a unidade, conforme apresentado abaixo.

$$CDQO_a = \frac{DQO_{LR} \times Q_{LR}}{1.000} = \frac{270 \times 510.000}{1.000} = 137.700 \text{ kgDQO/mês}$$

$$CSST_a = \frac{SST_{LR} \times Q_{LR}}{1.000} = \frac{150 \times 510.000}{1.000} = 76.500 \text{ kgSST/mês}$$

$$CSSV_a = \frac{SSV_{LR} \times Q_{LR}}{1.000} = \frac{135 \times 510.000}{1.000} = 68.850 \text{ kgSSV/mês}$$

Através da etapa experimental, concluiu-se que para obter-se uma produção ótima de biogás no digestor foi necessário manter uma relação substrato/inóculo (S/I) de 0,5 gSSV/gSSV e tempo mínimo de digestão de 20 dias. Deste modo, calculou-se a carga de sólidos no reator considerando-se o inóculo e o substrato.

- Massa de SSV presente no digestor como inóculo para TDH de 20 d:

$$MSSV_I = \frac{CSSV_a/30 \times TDH}{S/I} = \frac{68.850/30 \times 20}{0,5} = 91.800 \text{ kgSSV}$$

Em que:

$MSSV_I$ : Massa de SSV presente no digestor como inóculo (kg SSV);

$CSSV_a$ : Carga de SSV afluente (kg SSV/d);

TDH: Tempo de detenção hidráulica (d);

S/I: Relação substrato/inóculo(gSSV/gSSV).

- Massa de SSV de substrato aplicada no digestor para TDH de 20 d:

$$MSSV_S = CSSV_a/30 \times TDH = 68.850/30 \times 20 = 45.900 \text{ kgSSV}$$

Em que:

$MSSV_S$ : Massa de SSV de substrato aplicada no digestor (kg SSV);

$CSSV_a$ : Carga de SSV afluente (kg SSV/d);

TDH: Tempo de detenção hidráulica (d);

Considerando que a concentração de SSV no digestor se mantenha a mesma do substrato (esta consideração é conservadora, pois com a digestão anaeróbia a concentração de sólidos voláteis diminui), o volume necessário do digestor será:

$$V = \frac{CSSV_a + MSSV_I}{SSV_{LR}} = \frac{45.900 + 91.800}{135} = 1.020 \text{ m}^3$$

Onde:

V: Volume do digestor (m<sup>3</sup>);

$CSSV_a$ : Carga de SSV afluente (kg SSV/d);

$MSSV_I$ : Massa de SSV presente no digestor como inóculo (kg SSV);

$SSV_{LR}$ : Concentração de SSV na levedura residual (g SSV/L).

Deste modo, desconsiderando a redução de SSV devido à digestão dos sólidos, obtém-se que, levando em conta a relação S/I adotada, a carga de SSV no digestor é três vezes maior que a afluenta, logo, o volume do digestor deve possuir o triplo do potencial de armazenamento de substrato.

Em seguida, como se possui dados experimentais da digestão do substrato, calculou-se o volume do digestor através do tempo de detenção hidráulica (TDH). Este parâmetro foi escolhido com base na etapa experimental, sendo adotado o tempo necessário para ocorrer a estabilização da produção de biogás. O cálculo é apresentado a seguir.

$$V = 3 \times \frac{Q_{LR}/30 \times TDH}{1.000} = 3 \times \frac{510.000/30 \times 20}{1.000} = 1.020 \text{ m}^3$$

Em que:

V: Volume do digestor (m<sup>3</sup>);

Q<sub>LR</sub>: Vazão de levedura residual produzida (L/mês);

TDH: Tempo de detenção hidráulica (d).

Foram adotadas duas unidades de digestor, cujas dimensões estimadas foram:

- Altura útil (h<sub>u</sub>): 8,1 m;
- Diâmetro (D): 9 m;
- Volume por digestor (V<sub>d</sub>): 515 m<sup>3</sup>.

Deste modo, com base nestas dimensões, obteve-se um volume total resultante (V<sub>r</sub>) de:

$$V_r = n \times h_u \times \left( \frac{\pi \times D^4}{4} \right) = 2 \times 8,1 \times \left( \frac{\pi \times 9^2}{4} \right) = 1.030 \text{ m}^3$$

Em que:

V<sub>r</sub>: Volume total resultante dos digestores (m<sup>3</sup>);

n: Número de digestores (unidade);

h<sub>u</sub>: Altura útil do digestor (m);

D: Diâmetro do digestor (m).

O TDH resultante ( $TDH_r$ ) é apresentado abaixo.

$$TDH_r = \frac{V_r}{\frac{Q_{LR}/30}{1.000}} = \frac{1.030}{\frac{510.000/30}{1.000}} = 60,62 \text{ dias}$$

Onde:

$TDH_r$ : Tempo de detenção hidráulica resultante (d);

$V_r$ : Volume total resultante dos digestores ( $m^3$ );

$Q_{LR}$ : Vazão de levedura residual produzida (L/mês).

Observa-se que TDH resultante é bem maior que o pré-determinado para a ocorrência da produção de biogás. Isto ocorre devido à necessidade de volume adicional para o inóculo. Tem-se que, como o sistema é de fluxo contínuo, o substrato necessita de aproximadamente 20 dias para a ocorrência da digestão anaeróbia e produção de biogás, o restante do tempo esta mesma levedura digerida atua como inóculo, até que esta seja retirada do sistema.

A taxa de aplicação de sólidos resultante obtida é apresentada abaixo.

$$TAS = \frac{CSSV_T}{TDH_r \times V_r} = \frac{137.700}{60,62 \times 1.030} = 2,20 \text{ kgSSV}/m^3 \cdot d$$

Em que:

TAS: Taxa de aplicação de sólidos ( $kgSSV/m^3 \cdot d$ );

$CSSV_T$ : Carga de SSV total (substrato + inóculo) ( $kg \text{ SSV}/d$ );

$TDH_r$ : Tempo de detenção hidráulica resultante (d);

$V_r$ : Volume total resultante dos digestores ( $m^3$ ).

Verifica-se que esta se encontra dentro da faixa indicada para o tipo de reator adotado, que é de 1,6 a 3,2  $kgSSV/m^3 \cdot d$  (CHERNICHARO, 1997).



### Estimativa da produção de biogás

A produção de biogás no digestor foi estimada por meio taxa de produção de biogás (TPB), que consiste no volume de biogás produzido pela massa de DQO aplicada ao processo. Este parâmetro foi determinado através da média das produções nas etapas 1 e 3 da parte experimental. O cálculo da vazão de biogás produzida ( $Q_{\text{biogás}}$ ) é apresentado a seguir.

$$Q_{\text{biogás}} = CDQO_a \times \frac{TPB}{1.000} = 137.700 \times \frac{460}{1.000} = 63.342 \text{ m}^3/\text{mês}$$

Onde:

$Q_{\text{biogás}}$ : Vazão de biogás produzido ( $\text{m}^3/\text{mês}$ );

$CDQO_a$ : Carga de DQO afluyente ( $\text{kgDQO}/\text{mês}$ );

TPB: Taxa de produção de biogás ( $\text{mL biogás}/\text{g DQO aplicada}$ ).

A produção obtida corresponde a  $0,37 \text{ m}^3$  de biogás por hectolitro de cerveja produzida, ou seja,  $3,73 \text{ L}$  de biogás por litro de cerveja produzida.

### Estimativa da produção de lodo digerido

A estimativa do descarte de lodo digerido foi realizada considerando a eficiência de redução de SSV de 45%, adotada segundo JORDÃO E PESSÔA (2011), conforme pode ser observado abaixo.

$$P_{LD} = CSSV_a \times \frac{E_{SSV}}{100} = 68.850 \times \frac{45}{100} = 30.983 \text{ kgSSV}/\text{mês}$$

Onde:

$P_{LD}$ : Produção de lodo digerido ( $\text{kgSSV}/\text{mês}$ );

$CSSV_a$ : Carga de SSV afluyente ( $\text{kgSSV}/\text{mês}$ );

$E_{SSV}$ : Eficiência na redução de SSV (%).

O lodo descartado pode ser aplicado como composto fertilizante para o solo, entretanto, a avaliação desta aplicação não foi considerada neste estudo.

Estimativa da produção de energia

A produção de energia foi estimada através da capacidade energética do biogás e da eficiência dos equipamentos utilizados para a conversão do biogás em energia elétrica e/ou térmica. Os cálculos são apresentados a seguir.

▪ Sistema de cogeração de energia

A estimativa da produção de energia térmica no sistema de cogeração através de motor à combustão é apresentada abaixo.

$$P_{ETM} = Q_{biogás} \times PCB \times \frac{E_{ETM}}{100} = 63.342 \times 5.500 \times \frac{45}{100} \times \frac{4,19}{1.000} = 656.872 \text{ MJ/mês}$$

Onde:

$P_{ETM}$ : Produção de energia térmica no sistema de cogeração através de motor a combustão (MJ/mês);

$Q_{biogás}$ : Vazão de biogás produzido ( $m^3/mês$ );

$PCB$ : Poder calorífico do biogás ( $kcal/m^3$ );

$E_{ETM}$ : Eficiência de aproveitamento da energia térmica no motor a combustão (%).

Para a produção de energia elétrica tem-se que 1 kcal é equivalente a  $1,1625 \times 10^{-3}$  kWh, deste modo, o poder calorífico do biogás equivale a 6,39 kWh/ $m^3$  (PE). Assim, a estimativa da produção de energia elétrica no sistema de cogeração através de motor à combustão ( $P_{EEM}$ ) é apresentada a seguir.

$$P_{EEM} = Q_{biogás} \times PE \times \frac{E_{EEM}}{100} = 63.342 \times 6,39 \times \frac{30}{100} = 121.498 \text{ kWh/mês}$$

Onde:

$P_{EEM}$ : Produção de energia elétrica no sistema de cogeração através de motor a combustão (kWh/mês);

$Q_{biogás}$ : Vazão de biogás produzido ( $m^3/mês$ );

$PE$ : Equivalente em poder calorífico (kWh/ $m^3$ );

$E_{EEM}$ : Eficiência de aproveitamento da energia elétrica no motor a combustão (%).

- Sistema de geração de energia térmica

A produção de calor no sistema de geração de energia térmica através da combustão do biogás em caldeiras apresenta um potencial de produção conforme apresentado a seguir.

$$P_{ETC} = Q_{biogás} \times PCB \times \frac{E_{ETC}}{100} = 63.342 \times 5.500 \times \frac{75}{100} = 1.094.787 \text{ MJ/mês}$$

Onde:

$P_{ETC}$ : Produção de energia térmica no sistema de geração de energia térmica na caldeira (MJ/mês);

$Q_{biogás}$ : Vazão de biogás produzido ( $m^3/mês$ );

PCB: Poder calorífico do biogás ( $kcal/m^3$ );

$E_{ETC}$ : Eficiência de aproveitamento da energia térmica do biogás na caldeira (%).

### Consumo de energia na cervejaria

De acordo com SANTOS E RIBEIRO (2005) tem-se que uma cervejaria trabalhando de modo otimizado consome uma energia térmica de 150 a 200 MJ/hL de cerveja produzida e uma energia elétrica de 8 a 12 kWh/hL de cerveja produzida. Deste modo, com base nestas informações estimou-se o consumo de energia na cervejaria estudada, conforme apresentado a seguir.

- Consumo de energia térmica na cervejaria:

$$CET_c = TCET_c \times Q_c = 175 \times 170.000 = 29.750.000 \text{ MJ/mês}$$

Onde:

$CET_c$ : Consumo de energia térmica na cervejaria (MJ/mês);

$TCET_c$ : Taxa de consumo de energia térmica na cervejaria (MJ/hL);

$Q_c$ : Capacidade de produção de cerveja (hL/mês).

- Consumo de energia elétrica na cervejaria:

$$CEE_c = TCEE_c \times Q_c = 10 \times 170.000 = 1.700.000 \text{ kWh/mês}$$

Onde:

$CEE_c$ : Consumo de energia elétrica na cervejaria (kWh/mês);

$TCET_c$ : Taxa de consumo de energia térmica na cervejaria (kWh/hL);

$Q_c$ : Capacidade de produção de cerveja (hL/mês).

Comparando os consumos estimados de energia térmica e elétrica no sistema de produção de cerveja com a potencial produção de energia dos sistemas analisados, obtém-se que a energia térmica gerada no sistema de cogeração representa 2% do consumo de energia térmica na cervejaria. Do mesmo modo, a energia elétrica produzida no mesmo sistema representa cerca de 7% da energia elétrica consumida na cervejaria. Já o sistema de geração de energia térmica na caldeira produz uma energia térmica que representa cerca 4% do consumo deste tipo de energia na cervejaria.

### 5.2.3. Análise de viabilidade do sistema

A análise de viabilidade econômica dos sistemas propostos foi realizada visando avaliar a potencial economia de cada sistema de aproveitamento do biogás gerado na digestão anaeróbia da levedura residual do processo de produção de cerveja. Esta economia foi comparada com os gastos no consumo de energia térmica e elétrica na cervejaria. Em adição, também se comparou esta economia com o potencial crédito da comercialização da levedura residual como ração animal, a fim de avaliar se economicamente a aplicação do sistema proposto é viável.

Os parâmetros adotados para a análise foram:

- Preço do gás natural para as indústrias (CGN): R\$ 0,04/MJ (FIRJAN, 2013);
- Tarifa de fornecimento de energia elétrica para indústrias (CEE): R\$0,33/kWh (ANEEL, 2014);
- Poder calorífico do biogás (PCB): 5.500 kcal (IANNICELLI, 2008);
- Poder calorífico do gás natural (PCGN): 9.400 kcal (IANNICELLI, 2008);
- Concentração de SST na levedura residual ( $SST_{LR}$ ): 150 mgSST/L;
- Teor de umidade na levedura residual ( $TU_{LR}$ ): 10 %;

- Preço da levedura residual seca vendida como ração animal (CRA): R\$ 0,95/kg (ZANUTTO *et al.*, 1999)<sup>1</sup>.

#### Economia obtida no sistema de cogeração de energia

Para estimar a economia com energia térmica, primeiramente, analisou-se a equivalência energética do gás natural e do biogás. Conforme apresentado a seguir.

$$\frac{PCGN}{PCB} = \frac{9.400}{5.500} = 1,71$$

Onde:

PCGN: Poder calorífico do biogás (kcal);

PCB: Poder calorífico do gás natural (kcal).

Deste modo, tem-se que, energeticamente, 1 m<sup>3</sup> de gás natural equivale a 1,71 m<sup>3</sup> de biogás.

Em seguida, avaliou-se a economia a ser obtida com base no potencial de produção de energia térmica, conforme apresentado a seguir.

$$E_{ETM} = P_{ETM} \times CGN = 656.872 \times 0,04 = R\$ 27.262,34/mês$$

Em que:

E<sub>ETM</sub>: Economia com energia térmica obtida no sistema de cogeração (R\$/mês);

P<sub>ETM</sub>: Produção de energia térmica no sistema de cogeração (MJ/mês);

CGN: Preço do gás natural para as indústrias (R\$/MJ).

Esta economia com energia térmica equivale a R\$ 0,16/hL de cerveja produzida.

Do mesmo modo, estimou-se a economia com energia elétrica, conforme apresentado a seguir.

$$E_{EEM} = P_{EEM} \times CEE = 121.498 \times 0,33 = R\$39.630,18/mês$$

---

<sup>1</sup> O preço da levedura residual como ração animal foi adotado com base nos estudos de ZANUTTO *et al.* (1999) que indicavam um custo de R\$0,26/kg. Este valor foi corrigido através do índice IGP-M para o valor na data atual, resultando no valor apresentado.

Onde:

$E_{EEM}$ : Economia com energia elétrica obtida no sistema de cogeração (R\$/mês);

$P_{EEM}$ : Produção de energia elétrica no sistema de cogeração (MJ/mês);

CEE: Tarifa de fornecimento de energia elétrica para indústrias (R\$/kWh).

Esta economia com energia elétrica equivale a R\$ 0,23/hL de cerveja produzida.

A economia total gerada no sistema é apresentada na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8 – Economia obtida no sistema de cogeração de energia**

	<b>Economia Mensal (R\$/mês)</b>	<b>Economia por hL de cerveja (R\$/hL)</b>
Energia Térmica	27.262,34	0,16
Energia Elétrica	39.630,18	0,23
<b>Economia Total</b>	<b>66.892,51</b>	<b>0,39</b>

*Economia obtida no sistema de geração de energia térmica*

Para estimar a economia com energia térmica na caldeira procedeu-se conforme o item anterior. Deste modo, o cálculo é apresentado a seguir.

$$E_{ETC} = P_{ETC} \times CGN = 1.094.787 \times 0,04 = R\$ 45.437,23/\text{mês}$$

Em que:

$E_{ETC}$ : Economia com energia térmica obtida no sistema de geração de energia térmica na caldeira (R\$/mês);

$P_{ETC}$ : Produção de energia térmica no sistema de geração de energia térmica na caldeira (MJ/mês);

CGN: Preço do gás natural para as indústrias (R\$/MJ).

Esta economia equivale à R\$ 0,27/ hL de cerveja produzida.

Gastos da cervejaria com o consumo de energia

As estimativas dos gastos com o consumo de energia térmica e elétrica no processo de produção de cerveja são apresentadas abaixo.

- Gasto com o consumo de energia térmica:

$$GET_C = CET_C \times CGN = 29.750.000 \times 0,04 = R\$ 1.234.721,58/mês$$

Onde:

GET<sub>C</sub>: Gasto com o consumo de energia térmica (R\$/mês);

CET<sub>C</sub>: Consumo de energia térmica na cervejaria (MJ/mês);

CGN: Preço do gás natural para as indústrias (R\$/MJ).

- Gasto com o consumo de energia elétrica:

$$GEE_C = CEE_C \times CEE = 1.700.000 \times 0,33 = R\$ 554.506,00/mês$$

Onde:

GEE<sub>C</sub>: Gasto com o consumo de elétrica térmica (R\$/mês);

CEE<sub>C</sub>: Consumo de energia elétrica na cervejaria (MJ/mês);

CEE: CEE: Tarifa de fornecimento de energia elétrica para indústrias (R\$/kWh).

Obtém-se que a cervejaria gasta mensalmente com o consumo de energia térmica e elétrica R\$ 1.789.227,58.

Deste modo, a fim de comparar os gastos do consumo de energia na cervejaria com a economia que se pode obter através da implantação dos sistemas de aproveitamento da levedura residual propostos, apresenta-se na Tabela 5.9 a economia que cada sistema apresenta. Comparou-se a economia de cada tipo de energia com relação ao gasto com tipo de energia analisado e a economia total do sistema em relação ao gasto total da cervejaria com o consumo de energia.

**Tabela 5.9 – Potencial economia dos sistemas de geração de energia com relação ao gastos no consumo de energia na cervejaria**

<b>Economia obtida no sistema</b>	<b>Sistema de cogeração de energia</b>	<b>Sistema de geração de energia térmica na caldeira</b>
<b>Economia com a geração de energia térmica (%)</b>	2,2	3,7
<b>Economia com geração de energia elétrica (%)</b>	7,1	-
<b>Economia total do sistema (%)</b>	3,7	2,5

*Crédito obtido na comercialização da levedura residual como ração animal*

Para calcular o crédito obtido na comercialização da levedura residual como ração animal, primeiramente, estimou-se a quantidade de levedura residual seca obtida após o processo de secagem, necessário para esta aplicação. Os cálculos são apresentados a seguir.

$$M_{LRS} = \frac{Q_{LR} \times SST_{LR}}{1.000 \times \left(1 - \frac{TU_{LR}}{100}\right)} = \frac{510.000 \times 150}{1.000 \times \left(1 - \frac{10}{100}\right)} = 85.000 \text{ kg/mês}$$

Onde:

$M_{LRS}$ : Massa de levedura residual seca obtida na secagem (kg/mês);

$Q_{LR}$ : Vazão de levedura residual produzida (L/mês);

$SST_{LR}$ : Concentração de SST na levedura residual (mgSST/L);

$TU_{LR}$ : Teor de umidade na levedura residual (%).

A partir desta, e do preço de venda da levedura obtida no sistema de secagem, obtém-se a receita com a venda da levedura residual para ração animal, conforme apresentado a seguir.

$$R_{LRA} = M_{LRS} \times CRA = 85.000 \times 0,95 = R\$ 80.750,00/mês$$

Onde:

$R_{LRA}$ : Receita da venda da levedura residual para ração animal (R\$/mês);

$M_{LRS}$ : Massa de levedura residual seca obtida na secagem (kg/mês);

$CRA$ : Preço da levedura residual seca vendida como ração animal (R\$/kg).



Esta receita corresponde a R\$ 0,48/hL de cerveja produzida.

Embora a comercialização da levedura para produção de ração animal apresente bom crédito, comparada com as alternativas analisadas, o sistema de produção de levedura seca para ração animal demanda um alto consumo energético (ZUPANCIC *et al.*, 2012), devido a necessidade de elevação da temperatura no processo de secagem. Deste modo, estes gastos precisam ser considerados para avaliar o lucro efetivo da venda da levedura para a produção de ração animal.

A estimativa dos principais custos com demanda energética do sistema, que são consumo de energia térmica e consumo de energia elétrica, foi realizada de acordo com um estudo realizado por MOTRICE (2013) e é apresentada a seguir. Considerou-se o Drum Dryer como equipamento de secagem, por este ser mais econômico.

Os parâmetros utilizados na estimativa foram:

- Capacidade de evaporação de água (E): 1.000 kg de água/h (MOTRICE, 2013);
- Capacidade de produção de massa seca (P): 117 kg de massa seca/h (MOTRICE, 2013);
- Consumo de vapor por kg de água evaporada ( $C_{V/A}$ ): 1,5 kg vapor/kg água evaporada (MOTRICE, 2013);
- Consumo de energia elétrica por kg de água evaporada ( $C_{EE/AE}$ ): 0,04 kWh/kg de água evaporada (MOTRICE, 2013);
- Custo do kg de vapor (CV): R\$ 0,05/kg vapor (MOTRICE, 2013);
- Custo da energia elétrica (CEE): R\$ 0,33/kWh (ANEEL, 2014).

A estimativa do gasto com energia térmica na forma de produção de vapor foi realizada conforme apresentado a seguir.

- Consumo de água evaporada por massa de produto seco:

$$C_{A/PS} = \frac{E}{P} = \frac{1.000}{117} = 8,55 \text{ kg de água/kg massa seca}$$

Em que:

$C_{A/PS}$ : Consumo de água evaporada por massa de produto seco (kg água/kg massa seca);

E: Capacidade de evaporação de água (kg água/h);

P: Capacidade de produção de massa seca (kg massa seca/h).

- Consumo de água evaporada na secagem:

$$C_A = M_{LRS} \times C_{A/PS} = 85.000 \times 8,55 = 726.496 \text{ kg água/mês}$$

Em que:

$C_A$ : Consumo de água evaporada na secagem (kg água/mês);

$M_{LRS}$ : Massa de levedura residual seca obtida na secagem (kg massa seca/mês);

$C_{A/PS}$ : Consumo de água evaporada por massa de produto seco (kg água/kg massa seca);

- Consumo de vapor na secagem:

$$C_{VS} = C_A \times C_{V/A} = 726.496 \times 1,5 = 1.089.743 \text{ kg vapor/mês}$$

Em que:

$C_{VS}$ : Consumo de vapor na secagem (kg vapor/mês);

$C_A$ : Consumo de água evaporada na secagem (kg água/mês);

$C_{V/A}$ : Consumo de vapor por kg de água evaporada (kg vapor/kg água evaporada).

- Custo para a produção de energia térmica na forma de vapor:

$$CET_V = C_{VS} \times CV = 1.089.743 \times 0,05 = R\$ 54.487,18/mês$$

Em que:

$CET_V$ : Custo para a produção de energia térmica na forma de vapor (R\$/mês);

$C_{VS}$ : Consumo de vapor na secagem (kg vapor/mês);

$CV$ : Custo do kg de vapor (R\$/kg vapor).

A estimativa do consumo de energia elétrica no sistema foi realizada conforme apresentado a seguir.

- Consumo de energia elétrica no processo de secagem:

$$C_{EES} = C_A \times C_{EE/AE} = 726.496 \times 0,04 = 29.060 \text{ kWh/mês}$$

Onde:

$C_{EES}$ : Consumo de energia elétrica no processo de secagem (kWh/mês);

$C_A$ : Consumo de água evaporada na secagem (kg água/mês);

$C_{EE/AE}$ : Consumo de energia elétrica por kg de água evaporada (kWh/kg de água evaporada).

- Custo do consumo de energia elétrica no processo de secagem:

$$CEE_S = C_{EES} \times CEE = 29.060 \times 0,33 = R\$ 9.478,74/mês$$

Onde:

$CEE_S$ : Custo do consumo de energia elétrica no processo de secagem (R\$/mês);

$C_{EES}$ : Consumo de energia elétrica no processo de secagem (kWh/mês);

$CEE$ : Custo da energia elétrica (R\$/kWh).

Deste modo, verifica-se que os gastos com demanda energética do sistema são consideráveis comparados com a receita obtida na venda da levedura residual para produção de ração animal. A Tabela 5.10 apresenta o potencial lucro a ser obtido através considerando os gastos com consumo de energia no sistema.

**Tabela 5.10 – Receita, custos e lucro da produção de levedura para ração animal**

<b>Processo</b>	<b>R\$/mês</b>	<b>R\$/hL</b>
Comercialização da levedura para ração animal	80.750,00	0,48
Consumo de energia térmica	54.487,18	0,32
Consumo de energia elétrica	9.478,74	0,06
<b>Lucro do sistema</b>	<b>16.784,09</b>	<b>0,10</b>

### Comparação das aplicações

A Tabela 5.11 apresenta o retorno financeiro de cada aplicação estudada para a levedura residual de cervejaria.

Tabela 5.11 – Comparação econômica das alternativas estudadas

Aplicação	Retorno financeiro	
	R\$/mês	R\$/hL
<b>Cogeração de energia</b>	66.892,51	0,39
<b>Geração de energia térmica</b>	45.437,23	0,27
<b>Produção de Ração Animal</b>	16.784,09	0,10

Analisando os resultados obtidos observa-se que ambas as aplicações de geração de energia através do biogás produzido na digestão anaeróbia da levedura residual de cerveja são economicamente viáveis quando comparadas com utilização da levedura para produção de ração animal. A que apresenta melhores resultados, permitindo maior aproveitamento da energia do biogás e maior lucro, é a cogeração de energia.

Observa-se que, como se realizou uma análise simplificada da viabilidade econômica dos sistemas propostos, os gastos operacionais com os sistemas de cogeração de energia e de geração de energia térmica na caldeira não foram considerados. Apenas foram considerados, de forma simplificada, alguns custos operacionais do sistema de produção de levedura residual para ração animal, que de acordo com a literatura influenciavam de forma significativa no retorno financeiro do sistema.

Em adição, também não foram considerados os custos de implantação em cada sistema. Deste modo, para uma análise mais detalhada é necessário levantar os custos de operação e de implantação de cada sistema para avaliar de forma mais aprofundada as vantagens econômicas de cada um.

## 6. CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado pode-se concluir que a geração de energia através do biogás produzido na digestão anaeróbia da levedura residual de cervejaria é viável, pois se verifica que a levedura residual é um bom substrato para geração de biogás através da digestão anaeróbia, pois possui alta biodegradabilidade, alto potencial de geração de metano e não necessita da aplicação de pré-tratamentos. Em adição, o sistema de cogeração de energia e o sistema de geração de energia térmica por meio de combustão na caldeira demonstraram-se economicamente viáveis em comparação a utilização da levedura na produção de ração animal, que é o uso mais aplicado para este subproduto.

Conclusões específicas:

- A relação substrato/inóculo que apresenta a maior produtividade de biogás e de metano e também a maior biodegradabilidade, caracterizando-se como a melhor relação S/I para este substrato, é a de 0,50 g SV/g SV;
- Os pré-tratamentos térmico e ultrassônico realizam modificações na estrutura físico-química dos substratos, entretanto não causam a solubilização significativa de componentes do meio;
- Na digestão anaeróbia, o pré-tratamento térmico acelera a etapa de metanogênese, aumentando a produção de metano inicial. Este fato pode ser verificado através das maiores constantes de hidrólise obtidas ( $K_h$ ) pelas condições as quais foram aplicadas este tipo de pré-tratamento. Entretanto, verifica-se que a produção de metano não é influenciada positivamente, podendo apresentar resultados bastante abaixo do produzido pelo substrato sem pré-tratamento;
- Analisando o sistema de cogeração de energia obtém-se que a energia térmica potencialmente gerada corresponde a 2% da energia térmica consumida na cervejaria, do mesmo modo que a energia elétrica gerada corresponde a 7% do consumo deste tipo de energia. De forma global, obtém-se que o sistema de cogeração de energia gera uma economia de cerca de 4% com relação aos gastos totais com o consumo de energia térmica e elétrica na cervejaria;

- Analisando o sistema de geração de energia térmica através de combustão na caldeira, tem-se que a energia produzida corresponde a cerca de 4% da energia térmica consumida na cervejaria e a mesmo percentual dos gastos relativos ao consumo deste tipo de energia. Em adição, esta economia corresponde a 2,5 % dos gastos totais com consumo de energia térmica e elétrica na cervejaria;
- Analisando a receita obtida na comercialização da levedura residual seca para produção de ração animal, verifica-se que esta apresenta uma boa lucratividade, com relação às outras aplicações analisadas. Entretanto, também se verifica que o sistema de secagem da levedura possui alta demanda energética, o que agrega custos consideráveis ao processo como um todo;
- Dentre as alternativas de geração de energia propostas tem-se que, preliminarmente, a cogeração de energia é a opção mais vantajosa, possibilitando uma economia de R\$ 0,39/hL de cerveja produzida, enquanto que a geração de energia térmica na caldeira apresenta uma economia de R\$ 0,27/hL de cerveja produzida.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Para aprofundar e contribuir para a melhoria deste trabalho, recomenda-se que:

- Um estudo em escala piloto seja realizado, a fim de determinar de forma mais concreta a cinética da digestão anaeróbia da levedura residual de cervejaria e, a partir destes resultados, obtenha-se parâmetros de dimensionamento adaptados a este tipo de substrato;
- Um estudo econômico mais aprofundado seja realizado, na qual sejam considerados dados reais e sejam calculados os custos de implantação e de operação de todos os sistemas estudados, a fim de confirmar os resultados obtidos neste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. 2000. 142 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation (APHA/AWWA/WEF), 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- ANDRITZ. **Yeast Drying – Added value instead of waste**. Disponível em: <<http://www.andritzgouda.com/pt/index.php/proceslijn/yeast>>. Acessado em: 02/09/2014.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios ANEEL**. 2014. Disponível em: <<http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx>>. Acessado em: 01/10/2014.
- ANGELIDAKI, I., ALVES, M., BOLZONELLA, D., BORZACCONI, L., CAMPOS, J. L., GUWY, A. J., KALYUZHNYI, S., JENICEK, P., VAN LIER, J. B.; Defining the biomethane potencial (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays, **Water Science & Technology – WST**, 59.5, 927 – 934. 2009.
- ATKINSON, B.; MAVITUNA, F.; **Biochemical Engineering and Biotechnology Handbook**. Nova York: Macmillan Publishers Ltd – Stockton Press, p.1.119. 1987.
- BRAEKEN L.; VAN DER BRUGGEN B.; VANDECASTEELE C.; Regeneration of brewery waste water using nanofiltration. **Water Research**, 38, 3075–3082. 2004.
- BUENDÍA, I. M. *et al.*; Biodegradability of meat industry wastes under anaerobic and aerobic conditions. **Water Research**, 42:3767. 2008.
- CABALLERO-CÓRDOBA, G. M.; PACHECO, M. T. B.; SGARBIERI, V. C. Composição química de biomassa de levedura integral (*Saccharomyces cerevisiae*) e determinação do valor nutritivo da proteína, em células íntegras ou rompidas mecanicamente. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 17, n. 2, p. 102-106, 1997.



- CARLSSON, M.; LAGERKVIST, A.; MORGAN-SAGASTUMA, F.; The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review, **Waste Management**, 32, 1634-1650. 2012.
- CASSINI, S. T.; VOZOLLER, R. F.; PINTO, M. T.; **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RiMA, Capítulo 1, 13p. 2003.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2007. 380p.
- CHERNICHARO, C. A. L.; **Reatores anaeróbios**. 5<sup>a</sup> ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1997, V.5. p.245.
- COSTA, A. G.; MAGNANI, M.; CASTRO-GOMEZ, R. J. H.; Obtenção e caracterização de manoproteínas da parede celular de leveduras de descarte em cervejaria. **Acta Scientiarum**. Biological Sciences Maringá, v. 34, n. 1, p. 77-84, Jan.-Mar., 2012.
- CRITES, R. W; TCHOBANOGLOUS, G.; **Small & decentralized wastewater management systems**. 1a ed. Blacklick, Ohio, U.S.A: McGraw-Hill, 1998, p.1104.
- CUETOS, M.J. *et al.*; Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (*OFMSW*). **Biochemical Engineering Journal**, 40:99, 2008.
- DONOSO-BRAVO, A., PÉREZ-ELVIRA, S. I., FDZ-POLANCO, F.; Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests. Evaluation of pre-treatment processes, **Chemical Engineering Journal**, 160, 607-614. 2010.
- ENVIRONMENT CANADA; Technical pollution prevention guide for brewery and winery operations in the Lower Frasier Basin, Environment Canada, Vancouvert, 101p. 1997.
- ETHERIDGE, S. P. Biogas Use in Industrial Anaerobic Wastewater Treatment. In: *Energy from Biogas*. CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de Sao Paulo. Sao Paulo, 23 –24, Apr., 2003.
- FARNUN, C.; CLELAND, J. Extration of protein from mechanically disrupted freeze-dried brewer's yeast. **Journal of Milk and Food Technology**, Orange, 38(2) 219 - 222, 1975.

- FERNANDES, S. R.; ZANETTI, G.; SCHIMIDT, P.; ROSSI, P. Uso de leveduras como probióticos na alimentação de bovinos de corte. 2000. Disponível em: <<http://www.beefpoint.com.br/radares-tecnicos/nutricao/uso-de-leveduras-comoprobioicos-na-alimentacao-de-bovinos-de-corte-68365/>>. Acessado em: 20/08/2014.
- FERREIRA, I. M. P. L. V. O.; PINHO, O.; VIEIRA, E.; TAVARELA, J. G. Brewer's *Saccharomyces* yeast biomass: characteristics and potential applications. **Trends in Food Science & Technology**, 21; 77 – 84, 2010.
- FILLAUDEAU L., BLANPAIN-AVET P., DAUFIN G.; Water, wastewater and waste management in brewing industries, *Journal of Cleaner Production* 14, (2006) 463–471. 2006.
- FIRJAN – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **O preço do gás natural para as indústrias no Brasil e nos Estados Unidos – Comparativo de Competitividade**. Gerência de Competitividade Industrial e Investimentos. Diretoria de Desenvolvimento Econômico e Associativo. 2013. Disponível em: <[www.firjan.org.br](http://www.firjan.org.br)>. Acesso em: 1 de out. 2014.
- FORESTI, E.; FLORENCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P.F.F.; **Fundamentos do Tratamento Anaeróbio**. In: CAMPOS, J.R. (Coord.). *Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo*. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p.29-52.
- GHOSH, S.; Kinetics of acid-phase fermentation anaerobic digestion. **Biotechnology Bioeng**, 2:301. 1981.
- GRANATO, E. F.; **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça**. Dissertação (*Mestrado*) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2003.
- GRUPO ULLMAN. **Levedura de Cerveja**. 2011. Disponível em: <<http://grupoullmann.com.br/levedura-de-merceja.php>> . Acessado em: 21/08/2014.
- GUZMÁN-JUAREZ, M. **Development in Food Proteins 2**. London, Applied Science Publishers, 1983, 339 p.
- HUIGE, N. J. Brewery by-products and effluents. In F. G. Priest, & G. G. Stewart (Eds.), **Handbook of brewing**, 656 – 713. 2006.

- IANNICELLI, A. L. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Gestão Ambiental na Indústria) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 1050 p. ISBN – 978-85-7022-169-8.
- KANAGACHANDRAN K.; JAYERANTENE R.; Utilisation potential of brewery wastewater sludge as an organic fertilizer, **Journal of the Institute of Brewing**, 112 (2), 92–96. 2006.
- LETTINGA, G.; Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie Leeuwenhoek* 67, 3–28. 1995.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa nº 13, de 30 de novembro de 2004. Aprova o regulamento técnico sobre aditivos para produtos destinados à alimentação animal, segundo as boas práticas de fabricação, contendo os procedimentos sobre avaliação da segurança de uso, registro e comercialização. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/animal/alimentacao/legislacao>>. Acessado em: 24/08/2014.
- MASSEY, M.L.; POHLAND, F.G.; Phase separation of anaerobic stabilization by kinetic controls. **J. Water pollut. Control. Fed.** 50:2204, 1978.
- MELO, K. P. **Secagem de biomassa de levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) em um secador atmosférico condutivo com agitação mecânica: caracterização e avaliação do produto seco como bioadsorvente e complemento nutricional**. 2010. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- METCALF, E.; EDDY, M.; **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4ª ed. New York: McGraw-Hill, 2003, p.1.820.
- MOTRICE. **Processos e Perspectivas de Mercado para a Levedura Seca**. 2013. Disponível em: <<http://www.motrice.com.br/?id=133>>. Acessado em: 20/08/2014.
- NCR - NATIONAL RESEARCH COUNCIL – Nutrients Requeriments of Dairy Cattle. Washington: National Academic Press. ed. 6, p. 17, 1988.

- NEIRA, K.; JEISON, D.; Anaerobic co-digestion of surplus yeast and wastewater to increase energy recovery in breweries, **Water Science & Technology – WST**, 61.5, 1129 – 1135. 2010.
- OLIVEIRA, J. S.; ZANINE, A. M., SANTOS, E. M. Uso de aditivos na nutrição de ruminantes. **Revista Eletrônica de Veterinária REDVET**, Vol. VI, Nº 11, Nov., 2005.
- PRATI, L. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores**. 2010. 83 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- ROCHA, A. P. T.; ALSINA, O. L. S.; SILVA, V. S.; SILVA, F. L. H. Cinética de produção de levedura seca em leite de jorro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.1, p.81–86, 2008.
- ROSA, S. E. S.; CONSENZA, J. P.; LEÃO, L. T. S. Panorama do Setor de Bebidas no Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 23, p. 101-150, mar. 2006.
- SANTOS, M. S.; RIBEIRO F. M.; **Cervejas e refrigerantes**. São Paulo : CETESB, p. 58 (Série P + L). 2005.
- SGARBIERI, V. C.; ALVIM, I. D.; VILELA, E. S. D.; BALDINI, V. L. S.; BRAGAGNOLO, N. **Produção piloto de derivados de levedura (*Saccharomyces sp.*) para uso como ingrediente na formulação de alimentos**. Brazilian Journal of Food Technology, v. 2, n. 1/2, p. 119-125, 1999.
- SILVA, A. M. B. **Perspectivas de utilização da cogeração a gás em empreendimentos do setor terciário da região metropolitana do Estado do Rio de Janeiro**. 1997. Dissertação (Mestrado) - COPPE, UFRJ, 1.997.
- SILVA, V. S. **Secagem de leveduras – Estudo comparativo do desempenho dos secadores em leite de jorro e leite fluidizado**. 2004. 156p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.
- SILVA, W. R. (2009) **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais**. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

- SOUZA, A. A. Resíduos de cervejaria na nutrição de bovinos de corte. 2004. Beef Point. Disponível em: < <http://www.beefpoint.com.br/radares-tecnicos/nutricao/residuos-de-cervejaria-na-nutricao-de-bovinos-de-corte-18728/>>. Acessado em: 20/08/2014.
- SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, A. A. PAVAN. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta Scientiarum**, v.26, n. 2, p. 127-133, 2004.
- SPEECE, R. E.; Anaerobic Biotechnology and Odor/Corrosion Control and Industries. **Archae Press**, Nashville, Tennessee. 2008.
- THOMAS, K. R.; RAHMAN, P. K. S. M. Brewery wastes. Strategies for sustainability. A review. **Aspects of Applied Biology**, 80, pp.147-153. 2006.
- VARESCHE, M. B. A.; SAKAMOTO, I. K.; OLIVEIRA, L. L.; **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Cap. 4 – Comunidade Microbiana, 75 – 94. 2013.
- VILELA, E.S.D.; SGARBIERI, V.C.; ALVIM, I.D.; Valor nutritivo da biomassa de células íntegras, do autolisado e do extrato de levedura originária de cervejaria. **Revista de Nutrição**, v.13, n.2, p.127-134, 2000.
- YAMADA, E. A.; ALVIM, I. D.; SANTUCCI, M. C.; SGARBIERI, V. C. Composição centesimal e valor proteico de levedura residual da fermentação etanólica e de seus derivados. **Revista de Nutrição**, Campinas, 16(4); 423 – 432, out./dez., 2003.
- YANG, S. T.; GUO, M.; Kinetics of methanogenesis from whey permeate in packed bed immobilized cells bioreactor. **Biotechnology Bioengineering**, 36:427. 1990.
- ZAIAT, M.; **Desenvolvimento e análise de biorreatores anaeróbios contendo células imobilizadas: reator anaeróbio horizontal de leito fixo reator operado em bateladas sequenciais**. Livre Docência - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ZAIAT, M.; FORESTI, E.; Method for estimating the kinetic of substrate degradation in horizontal-Flow anaerobic immobilized sludge reactor. **Biotechnology Techniques**, 11:315. 1997.
- ZANUTTO, C. A.; MOREIRA, I.; FURLAN, A. C.; SCAPINELLO, C.; MURAKAMI, A. E. Utilização da levedura de recuperação (*Saccharomyces* sp.), seca por rolo rotativo ou por spray-dry, na alimentação de leitões na fase inicial. **Acta Scientiarum** 21(3):705-710, 1999.

ZUNPANČIČ, G. D.; KLEMENČIČ, M.; STARŽIŠČAR, M.; Improving the energy balance in brewing industry using waste yeast as energy substrate, in Olabi A. G. (Eds.). Sustainable energy beyond 2020. In proceedings of the 3<sup>rd</sup> International conference on sustainable energy & environmental protection: Part 2. Dublin City University, Ireland, pp 64-69. 2009.