

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL**

**FLÁVIO RAPOSO PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO  
ANAERÓBICA: ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE  
CHOCOLATE**

VITÓRIA  
2014

**FLÁVIO RAPOSO PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO  
ANAERÓBICA: ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE  
CHOCOLATE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na área de concentração em Engenharia Sanitária.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Laura Marina Pinotti

VITÓRIA  
2014

**FLÁVIO RAPOSO PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO  
ANAERÓBICA: ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE CHOCOLATE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na área de concentração em Engenharia Sanitária.

Aprovada em            de            de 2014.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Laura Marina Pinotti  
Orientador - UFES

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Cristiane Zdradek  
Examinador Interno - IFES

---

Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Estela Cláudia Ferretti  
Examinador Externo - UFES

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)

(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

xxxx Pereira, Flávio Raposo, 1972 -

Avaliação da produção de biogás a partir da digestão anaeróbica: estudo de caso em uma fábrica de chocolate / Flávio Raposo Pereira – 2013

Xxx f. : il.

Orientador: Laura Marina Pinotti.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Efluentes da Indústrias de Chocolate - Tratamento anaeróbico. 2. Produção de biogás. 3. Geração de energia – Sustentabilidade I. Pinotti, Laura Marina. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

---

CDU: xxxx

Dedico este trabalho a minha família, minha mãe e meu irmão, pelo apoio, carinho e principalmente pela paciência e compreensão.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado esta oportunidade, guiar meus caminhos, me iluminar e abençoar durante toda esta jornada.

A minha esposa, Graciela, pelo incansável e incondicional apoio nesta minha trajetória.

Aos meus filhos: Pedro, Maria Luiza e João, pela motivação maior.

A minha mãe e meu irmão, Joaquina e Bruno, pelo apoio neste momento.

A minha orientadora Laura M. Pinotti, pela confiança, paciência, por todas as orientações sempre importantes e por todo carinho.

A André Iannicelli, pelos valiosos conselhos, apoio e dicas. Além de fornecer os dados e orientações para pesquisa.

Aos professores do curso de Pós Graduação, Renato Siman, Alvin Borges, José Antônio Tosta, Daniel Rigo e Sérgio Túlio, pelo apoio.

Aos amigos do PGES, por toda a ajuda ou pela simples convivência.

À banca examinadora: Prof. Dra. Cristiane Zdradek e Prof. Dra. Estela Cláudia Ferretti pela disponibilidade e atenção ao meu trabalho.

À empresa Teccalor, pela atenção e pelo fornecimento de informações importantes para pesquisa.

*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim. ”*

(Chico Xavier)

## RESUMO

A pesquisa teve como objetivo avaliar a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica na unidade de tratamento de esgoto de uma fábrica de chocolate, que contempla um reator de fluxo ascendente de manta de lodo. O foco principal esteve relacionado à avaliação das emissões e à remoção da carga orgânica para a geração de biogás, favorecendo sua conversão em energia elétrica e/ou térmica. Em função da pouca variabilidade das emissões da demanda química de oxigênio (DQO) nos efluentes e da boa eficiência de remoção desta carga orgânica (83%), foram obtidos resultados que demonstraram que o reator produz de forma contínua cerca de 49.020m<sup>3</sup>/ano de biogás, o que corresponde a 5,60 m<sup>3</sup>/h. A pesquisa avaliou dois cenários para o aproveitamento energético desse gás, contemplando a possibilidade de geração de eletricidade por motorgerador ou a queima nas caldeiras junto com o gás natural (GN) para a geração de vapor. O primeiro cenário considerou a geração de energia elétrica através de um sistema de motorgerador de 9,5 Kwh a biogás, que operando a 20 h/dia pode produzir cerca de 58.400 Kwh/ano e obter uma receita de R\$ 20.296,00/ano. No segundo cenário, verificou-se que o biogás gerado durante o tratamento anaeróbico é equivalente 28.431 m<sup>3</sup>/ano de GN. Considerando que o consumo real de GN nas caldeiras é de 2.756.938 Nm<sup>3</sup>/ano, pode-se afirmar que o aproveitamento de biogás representaria uma economia de 1,02 % de GN, que em termos financeiros corresponderia a aproximadamente R\$ 32.540/ano para a empresa. Assim, concluiu-se que a utilização de biogás na caldeira traz maior retorno financeiro com a economia de gás natural, comparado com os resultados para geração de eletricidade. O biogás produzido na estação de tratamento em estudo traz benefícios que abrangem os três pilares do Desenvolvimento Sustentável: o econômico, o ambiental e o social. A harmonização destes pilares torna-se necessária para que ocorra um crescimento econômico capaz de otimizar e preservar os recursos naturais, sem comprometer as necessidades das gerações futuras.

**Palavras chave:** Chocolate. Tratamento anaeróbico. Biogás. Energia. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The research aimed at evaluating the biogas production from the anaerobic digestion at the sewage treatment unit of a chocolate factory, which contemplates an ascending flow reactor of sludge blanket. The main focus was related to the emission assessment and the removal of organic load for the generation of biogas, favoring its conversion into electric and/or thermal energy. Due to the little variability of the oxygen chemical demand emission (COD) in the effluents and the good efficiency concerning the removal of this organic load (83%), the results obtained indicate that the reactor produces, in a continuing way, about 49.020 m<sup>3</sup>/year biogas, what is correspondent to 5,60 m<sup>3</sup>/h. The research evaluated two scenarios for the energetic use of this gas, contemplating the possibility to generate electricity by a motor-generator set or by the burn in the boilers combined with natural gas (NG) in order to produce steam. The first scenario took into consideration the production of electric energy through a motor-generator system of 9,5 Kwh by biogas that when operating at 20 h/day is able to produce about 58.400 Kwh/year and obtain an income of R\$ 20.296,00/year. In the second scenario, it was verified that the biogas generated during the anaerobic treatment is equivalent to 28.431 m<sup>3</sup>/year of NG. Considering that the actual NG consumption in the boilers is 2.756.938 Nm<sup>3</sup>/year, it is stated that the biogas use would represent a savings of 1,02 % of NG, in financial terms, it would correspond to approximately R\$ 32.540/year to the company. This way, it is concluded that the use of biogas in the boiler brings a greater financial return with the savings of natural gas, comparing with the results for electricity production. The biogas produced in the treatment Station, through studies, brings benefits that cover the three pillars of Sustainable Development: the economic, the environmental and the social one. The matching of these three pillars becomes necessary in order to create an economic growth able to optimize and preserve the natural resources, without compromising the needs of the future generations.

Keywords: Chocolate. Anaerobic treatment. Biogas. Energy. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Produção de chocolate (em Mil Tons).....	23
Figura 2 - Esquema do fluxo de Produção de Chocolate – Entradas e Saídas.....	25
Figura 3 - Esquema de tratamento anaeróbico do reator UASB. ....	29
Figura 4 - Sequências metabólicas da digestão anaeróbica. ....	30
Figura 5 - Balanço de massa para uma planta da indústria de confeitaria. ....	32
Figura 6 - Poder calorífico inferior em função do percentual de metano. ....	36
Figura 7 – Rotas de conversão de matéria orgânica.....	43
Figura 8 - Classificação de algumas das principais alternativas para aproveitamento do biogás.....	45
Figura 9 - Fluxo resumido do processo de tratamento do efluente de uma fábrica de chocolate.....	51
Figura 10 - Vista do Reator UASB na Fábrica de Chocolate.....	52
Figura 11 - Fluxo de tratamento dos efluentes industriais e sanitários.....	53
Figura 12 - Valores de vazão do efluente para os anos 2011 à 2013. ....	65
Figura 13 - Teste de normalidade para a vazão do efluente para o período de 2011 a 2013 .....	65
Figura 14 - Valores da DQO do afluente do reator para os anos 2011 à 2013. ....	66
Figura 15 - Teste de normalidade das análises de DQO para o período de 2011 a 2013 .....	66
Figura 16 - Acompanhamento das emissões de DQO do afluente e efluente, e eficiência e remoção da DQO para período de 2011 a 2013 .....	67
Figura 17 - Teste de Normalidade para as emissões de DQO para o período de jan/2011 a jun/2012.....	68
Figura 18 - Teste de Normalidade para a eficiência de remoção da DQO para o período de jan/2011 a jun/2012.....	68

Figura 19 - Esquema do potencial de produção de biogás da fábrica de chocolate em estudo .....	73
Figura 20 - Ilustração do Cenário para geração de eletricidade.....	85
Figura 21 - Vista do Reator UASB e as caldeiras da fábrica em estudo. ....	91
Figura 22 - Ilustração do cenário para geração de vapor .....	93
Figura 23 - Abrangência do resultado da pesquisa .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição média do chocolate .....	24
Tabela 2 - Análise das águas residuárias na indústria de confeitaria.....	27
Tabela 3 - Tratamento anaeróbico para diferentes efluentes industriais.....	31
Tabela 4 - Requisitos ambientais para o metabolismo microbiano .....	32
Tabela 5 - Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbicos de efluentes domésticos .....	34
Tabela 6 - Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos .....	35
Tabela 7 - Comparação do PCI do biogás com outros gases.....	36
Tabela 8 - Equivalência energética do biogás.....	37
Tabela 9 - Restrição e remoção de impurezas para utilização do biogás .....	37
Tabela 10 - Fator de correção em função do sistema de tratamento ou sistema de descarga.....	42
Tabela 11 - Vantagens e desvantagens da utilização do biogás.....	44
Tabela 12 - Consumo de biogás para geração de energia elétrica .....	48
Tabela 13 - Tecnologias para geração de energia .....	49
Tabela 14 - Dados obtidos do reator UASB da indústria de chocolate para o período de 2011 a 2013 .....	64
Tabela 15 - Características do efluente da fábrica de chocolate em estudo - Jan/2011 a Jun/2012.....	69
Tabela 16 - Dados para cálculo da produção de biogás – Jan/2011 a Jun/2012.....	70
Tabela 17 - Memorial de cálculos para estimativa de produção de metano e biogás.....	71
Tabela 18 - Resultados obtidos no cálculo de produção de metano da fábrica de chocolate.....	72
Tabela 19 - Estimativa dos valores dos equipamentos para o cenário de geração de eletricidade.....	86
Tabela 20 - Especificação do Motorgerador.....	87
Tabela 21 - Custo da manutenção preventiva no motorgerador .....	88

Tabela 22 - Memorial de cálculo para a estimativa da receita esperada para o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade .....	89
Tabela 23 - Fluxo caixa para retorno de investimento para o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade .....	89
Tabela 24 - Características do biogás para dimensionamento .....	93
Tabela 25 - Memorial de cálculo para a estimativa da receita esperada para o aproveitamento do biogás em caldeiras.....	94
Tabela 26 - Fluxo caixa para retorno de investimento para o aproveitamento do biogás em caldeiras .....	94

## LISTA DE SIGLAS E/OU SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CENBIO	Centro Nacional de Biomassa
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
SST	Sólidos Suspensos Totais
TDH	Tempo de detenção hidráulica
GEE	Gases de efeito estufa
GN	Gás natural
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
PCI	Poder calorífico inferior
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.
(RECS-IW)	Sistema Racional de Controle Ambiental
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USEPA	United States Environmental Protection Agency

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>17</b>
1.1	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL.....	21
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
3.1	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA FÁBRICA DE CHOCOLATE.....	23
3.2	TRATAMENTO ANAERÓBICO NA INDÚSTRIA CONFEITEIRA .....	26
3.3	CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	34
3.4	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO E BIOGÁS.....	38
3.5	RECUPERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS .....	43
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>ARTIGOS</b> .....	<b>54</b>
5.1	ARTIGO 1 .....	55
	PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO TRATAMENTO ANAERÓBICO DE EFLUENTES EM UMA FÁBRICA DE CHOCOLATE .....	55
	<b>Resumo</b> .....	<b>55</b>
5.1.1	<b>Introdução</b> .....	<b>57</b>
5.1.2	<b>Materiais e Métodos</b> .....	<b>60</b>
5.1.2.1	<i>Coleta e Tratamento dos Dados</i> .....	60
5.1.2.2	<i>Método para Estimativa da Produção Do Biogás</i> .....	61
5.1.3	<b>Resultados e Discussão</b> .....	<b>63</b>
5.1.3.1	<i>Avaliação da Eficiência de Remoção da Carga Orgânica</i> .....	63
5.1.3.2	<i>Cálculo da Produção de Biogás</i> .....	70
5.1.4	<b>Conclusão</b> .....	<b>73</b>
5.1.5	<b>Referências</b> .....	<b>74</b>
5.2	ARTIGO 2 .....	77
	CENÁRIOS SUSTENTÁVEIS PARA APROVEITAMENTO DO BIOGÁS GERADO EM TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA FÁBRICA DE CHOCOLATE .....	77
	<b>Resumo</b> .....	<b>77</b>

<b>5.2.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>79</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Materiais e Métodos.....</b>	<b>81</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Resultados e Discussão.....</b>	<b>85</b>
5.2.3.1	<i>Aproveitamento do Biogás para Geração de Eletricidade.....</i>	<b>85</b>
5.2.3.2	<i>Aproveitamento do Biogás para Geração de Calor.....</i>	<b>90</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>95</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Referências .....</b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>100</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>104</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>106</b>



## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A crise ambiental fez surgir ações mitigadoras que possibilitem a preservação dos recursos naturais e minimizem os impactos ao meio ambiente (TETRAPLAN, 2010). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), a queima de combustíveis fósseis contribui com 57% das emissões que causam o aquecimento global. Sendo assim, as fontes renováveis de energia devem ser consideradas como alternativas aos combustíveis fósseis para que atendam às necessidades futuras de forma sustentável.

As pesquisas e investimentos na produção de energia a partir de fontes alternativas vêm crescendo, acompanhando o desenvolvimento econômico e principalmente se adequando à nova realidade do planeta. Neste contexto, destaca-se a valorização do biogás, que já foi considerado um subproduto obtido a partir da decomposição anaeróbica de resíduos urbanos, de animais e de lodos, produzido em estações de tratamento de efluentes domésticos e industriais. Atualmente, o aproveitamento do biogás proveniente do tratamento anaeróbico é considerado um processo de produção de energia, permitindo a geração de energia térmica e/ou elétrica, além de reduzir os gastos com eletricidade e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). (CENBIO, 2008; ERSAHIN *et al.*, 2011; BOULAMANTI *et al.*, 2013; CENBIO, 2008; WIRTHA, 2013). Esse gás destaca-se devido ao seu alto poder calorífico, é composto em sua maior parte por dois gases: metano (CH<sub>4</sub>), constituinte energético e seu principal componente, e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O CH<sub>4</sub> é considerado o mais impactante GEE emitido durante o tratamento de efluentes industriais e domésticos por apresentar um potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential - GWP*) 21 vezes maior do que o CO<sub>2</sub> (IPCC, 2006; CHERNICHARO e STUETZ, 2008).

De acordo com Costa (2006), a busca por incentivos ao uso dessas fontes alternativas de energia poderá equilibrar e/ou compensar os custos envolvidos com a implementação de projetos que visem à eficiência energética. É nesse contexto que esta pesquisa busca avaliar o potencial de geração de biogás de uma ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) de uma fábrica de chocolate, baseando-se nas emissões e na eficiência de remoção da matéria orgânica dos efluentes industriais e sanitários. Desta forma, surge a hipótese: Se a concentração de matéria orgânica nos efluentes

da indústria em estudo e sua consequente remoção pelo tratamento anaeróbico for relativamente alta, pode-se obter uma quantidade suficiente de biogás para ser utilizado na própria Indústria, de modo a economizar em gastos com energia.

Atualmente, a indústria em estudo possui em sua planta uma unidade de tratamento de esgoto com um reator de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB- *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), na qual o biogás gerado é queimado antes do lançamento à atmosfera na forma de gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Considerando que o biogás é uma das fontes alternativas de energia disponíveis no meio ambiente e que pode ser aproveitado para vários fins, propõem-se os seguintes questionamentos:

- A concentração de matéria orgânica nos efluentes da indústria em estudo e sua consequente remoção pelo tratamento anaeróbico é relativamente alta?
- A empresa em questão gera quantidades significativas de biogás para que se torne viável o seu reaproveitamento?
- Caso o biogás seja viável operacionalmente, quais são as alternativas para sua utilização?

Sendo assim, considerando-se os contextos ambiental, econômico e social, esta pesquisa tem como objetivo a realização do primeiro estudo de avaliação da produção de biogás na unidade de tratamento de esgoto de uma fábrica de chocolate, localizada no estado do Espírito Santo, e propor alternativas para o aproveitamento desse gás em forma de energia.

## 1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação apresentada foi estruturada conforme descrito a seguir.

O **Item 1** apresenta uma introdução ao tema da pesquisa e o **Item 2** especifica os objetivos principal e específicos. No **Item 3**, é apresentada uma revisão bibliográfica dos aspectos relacionados ao processo de produção de chocolate, digestão anaeróbica, geração e aproveitamento do biogás. O **Item 4** apresenta a caracterização da área de estudo.

No **Item 5**, são apresentados dois artigos desenvolvidos nesta pesquisa:

- **Artigo 1** (Item 5.1) – Estima-se a produção de biogás na estação de tratamento de efluentes de uma fábrica de chocolate, em função das emissões e da eficiência de remoção da carga orgânica.
- **Artigo 2** (Item 5.2) – São analisadas alternativas sustentáveis para a utilização do biogás na empresa em estudo.

Enfim, no **Item 6**, são apresentadas as discussões gerais sobre os resultados encontrados; no **Item 7**, as recomendações para futuras pesquisas; e, no **Item 8**, as referências bibliográficas.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica na unidade de tratamento de esgoto de uma fábrica de chocolate, com o intuito de utilizá-lo como fonte de energia.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a eficiência da remoção da carga orgânica do sistema de tratamento de efluentes da empresa em estudo, baseando-se em dados históricos das análises físico-químicas no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2013.
- Analisar os potenciais teóricos de produção de biogás e de metano a partir da remoção da demanda química de oxigênio (DQO) da estação de tratamento de esgoto, baseando-se em dados históricos das análises físico-químicas no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2013.
- Avaliar cenários sustentáveis para a utilização do biogás gerado no tratamento de efluentes como forma de energia.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA FÁBRICA DE CHOCOLATE

Considerado um produto alimentício produzido a partir do cacau, nas suas diferentes formas (massa, manteiga, pó, etc.) misturadas com açúcar, leite e outros ingredientes, o chocolate ganhou mercado e enorme evolução no processo produtivo, de forma a atender o mercado consumidor em grande escala. No entanto, o aumento da produção do chocolate tende a aumentar a geração de resíduos, tornando necessário o desenvolvimento de sistemas de tratamento eficientes, que considerem diretamente os níveis de emissão de resíduos e suas características.

Acredita-se que o cacau já era consumido pelos Maias e Astecas há cerca de 3 mil anos. Ao longo dos anos, passou por modificações em seu beneficiamento de forma a ser difundido e absorvido culturalmente na forma de chocolate, mas foi só em 1765 que a companhia Baker, localizada nos Estados Unidos, iniciou a primeira produção industrial de chocolate no mundo. No Brasil, a indústria passou por um grande crescimento a partir da década de 1970 até a década de 1980, atingindo 160% neste período, com um aumento na produção de 46 mil toneladas para 121 mil/t ano. Nessa época, ocorreu uma campanha institucional que favoreceu a mudança de hábito de consumo de chocolate no país (ABICAB, 2014). Em um período mais recente, entre 2008 e 2013, verifica-se um aumento de 36% no volume de produção, atingindo 800 mil toneladas neste último ano, conforme apresentado na Figura 1.

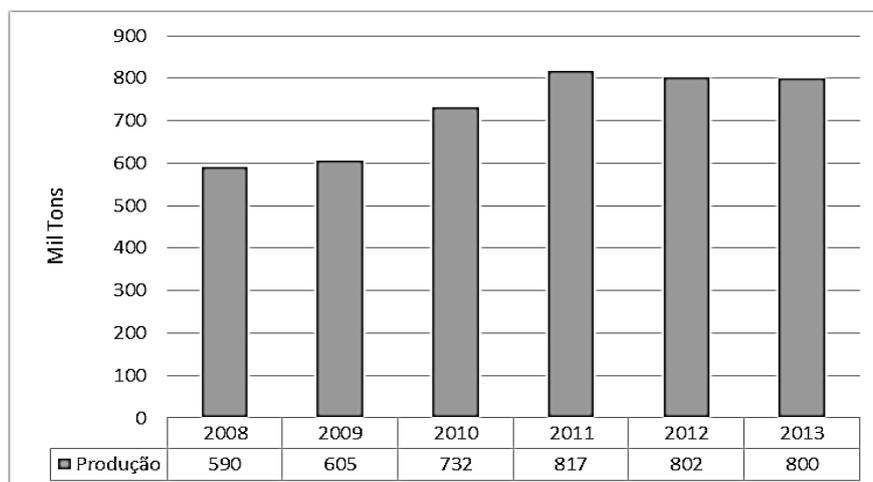


Figura 1 - Produção de chocolate (em Mil Tons).

Fonte: ABICAB (2014).

O chocolate é formulado a partir da mistura de líquido (massa de cacau), manteiga de cacau, açúcar (sacarose), leite, derivados lácteos, emulsificantes e aromatizantes, sendo que a sua composição dependerá diretamente das características finais e qualidades desejadas. A composição dos produtos varia de acordo com os níveis de adição de ingredientes na fase inicial ou durante o processo, com adição de frutas, castanhas, biscoito, entre outros. (RICHTER e LANNES, 2007)

Dentre seus ingredientes, a manteiga de cacau pode constituir até mais de 1/3 da formulação do chocolate, sendo considerada um dos componentes mais importantes por ser um dispersante das partículas sólidas de cacau, açúcar e leite. É composta basicamente por triglicerídeos (aproximadamente 98%), sendo o restante constituído por monoglicerídeos e ácidos graxos livres, além de elementos menores solubilizados, tais como esteróis e tocoferóis. Três principais ácidos graxos são encontrados na composição da manteiga de cacau: ácido palmítico (C16:0), ácido esteárico (C18:0) e ácido oleico (C18:1) (COHEN, *et al.*, 2004).

Deve-se considerar também um estudo realizado por Suzuki (2009) que mostra a composição química de vários produtos de chocolate, de forma a caracterizar quantitativamente cada um de seus elementos. Os dados obtidos fornecem valores médios da porcentagem desses componentes do chocolate puro e processado, conforme apresentado na Tabela 1.

Lipídios	27%
Proteínas	6%
Umidade	1%
Cinzas	1,5%
Carboidratos	64,5%

Fonte: Adaptado de Suzuki (2009).

Pode - se observar na Figura 2 as principais etapas de processamento do chocolate, enfatizando suas entradas e saídas.

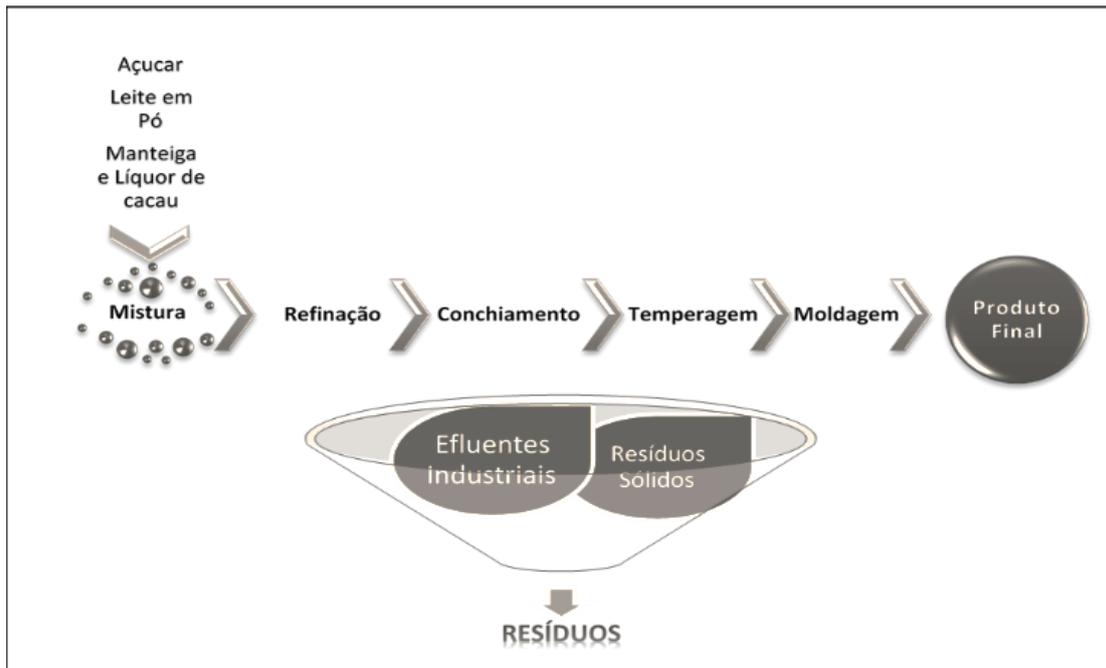


Figura 2 - Esquema do fluxo de Produção de Chocolate – entradas e saídas.

Fonte: Adaptação Suzuki (2009).

Inicialmente os ingredientes são misturados, o que consiste em homogeneizá-los nas proporções corretas da formulação até a obtenção de uma massa uniforme. Segue-se para o refino, no qual realiza-se a redução de granulometria da massa de modo que 90% das partículas atinjam dimensões em torno de  $20\mu$ . No conchiamento, o produto refinado é submetido por várias horas à agitação e cisalhamento, sob temperatura controlada ( $60^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$ ), removendo voláteis indesejáveis, promovendo a redução da umidade e da viscosidade e desenvolvendo sabor. Toda essa massa é transferida para as temperadeiras, sendo a etapa responsável pela indução da cristalização da manteiga de cacau na forma mais estável. Na moldagem e resfriamento, o chocolate líquido é depositado em moldes e resfriado até a fase gordurosa atingir um grau de cristalização adequado. Posteriormente, segue para a etapa de desmoldagem, finalizando com a embalagem do produto (SUZUKI, 2009).

Esse processo de produção gera resíduos sólidos compostos principalmente por chocolate, embalagens e ingredientes, que são descartados conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que “[...] prevê diretrizes relativos à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos[...].” (BRASIL, 2010). Além disso, produz efluentes constituídos por resíduos

ricos em matéria orgânica provenientes da lavagem de equipamentos. A Norma Brasileira NBR 9800/87 (ABNT, 1987) “[...] estabelece critérios para o lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público do esgoto sanitário [...]” e define efluentes de processos industriais como,

*“[...] Despejos líquidos provenientes das áreas de processamento industrial, incluindo os originados nos processos de produção, as águas de lavagem de operação de limpeza e outras fontes, que comprovadamente apresentem poluição por produtos utilizados ou produzidos no estabelecimento industrial.”*

Assim, diante da evolução e do nível de industrialização das fábricas de chocolate, que favoreceram o aumento de efluentes, faz-se necessário que estes passem por um tratamento antes de serem descartados para que se reduza a emissão de poluentes no meio ambiente.

### 3.2 TRATAMENTO ANAERÓBICO NA INDÚSTRIA CONFEITEIRA

A indústria de confeitaria é um importante ramo do setor de alimentos. De acordo com a Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (CNNPA, 1978), os produtos de confeitaria são os obtidos por cocção adequada de massa preparada com farinhas, amidos, féculas e outras substâncias alimentícias, como doces ou salgados, recheados ou não. Desse modo, ela é dividida em três segmentos principais: produtos de chocolate, produtos de doces em geral e produtos de farinha.

Essas indústrias geram grandes quantidades de águas residuárias, que contêm altas concentrações de materiais orgânicos facilmente biodegradáveis com alto teor de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Geralmente os efluentes industriais são o resultado da utilização de água pelas indústrias, em diversos processos, como lavagem de máquinas, tubulações, sistemas de resfriamento, ou diretamente no produto (ERSAHIN *et al.*, 2011; CHERNICHARO, 1997).

O efluente da indústria de fabricação do chocolate pode ser caracterizado como não tóxico, mas com alto teor de sólidos totais (SST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). Amostras coletadas do efluente de

uma indústria de chocolate localizada na Índia apresentaram os seguintes valores: SST de 2.344 mg/L; DBO de 640 mg/L; DQO de 1.459 mg/L e pH de 5,79 (PARTIL, *et al.*, 2009). A razão DQO/DBO fornece indicações sobre a biodegradabilidade de um efluente. Valores na faixa de 1,5 a 2,5 sugerem que os poluentes presentes no efluente sejam majoritariamente biodegradáveis, recomendando tratamento biológico (DEZOTTI, 2008). Portanto, especificamente para os resultados encontrados por Partil *et al.* (2009), pode-se afirmar que os efluentes desta indústria de chocolate são majoritariamente biodegradáveis, pois apresentam razão de DQO/DBO de 2,3. Valores superiores a 5 sugerem a presença de poluentes não biodegradáveis, o que pode inviabilizar o seu tratamento biológico (DEZOTTI, 2008).

Outros resultados de estudos da caracterização dos efluentes de indústrias confeitarias, realizados por Ersahin *et al.* (2011), são apresentados na Tabela 2, demonstrando a presença de altas cargas de matéria orgânica nestes efluentes.

Tabela 2 - Análise das águas residuárias na indústria de confeitaria

DQO (mg/L)	2.840 - 6220
DQO <sub>SOLÚVEL</sub> (mg/L)	2.500 - 5.400
DBO (mg/L)	1.840 - 4.910
SST (mg/L)	260 - 440
N <sub>TOTAL</sub> (mg/L)	33 - 55
P <sub>TOTAL</sub> (mg/L)	8,6 - 65
pH	4,0 - 5,1
SV (mg/L)	490
Óleos e Graxas (mg/L)	367

Fonte: adaptado de Ersahin *et al.* (2011).

Além das altas taxas de carboidratos e açúcares, os efluentes de uma indústria de chocolate apresentam altos teores de lipídios, o que pode inibir o processo anaeróbico (GUERRERO, *et al.*, 1996). Guerrero (1996) realizou o tratamento do efluente de uma

indústria de chocolate com teores de óleos e graxas de 425 a 970mg/L, sólidos solúveis totais (SST) de 2400 mg/L e DQO de 6.500 a 12.500 mg/L. Os autores observaram que parte da gordura residual era adsorvida pelo lodo, reduzindo a transferência de substrato e produzindo nata pela flotação de lodo. No entanto, mesmo nestas condições, obteve-se a remoção de 70% da carga orgânica inicial. Para realizar o tratamento desses efluentes, Esparz-Soto (2013) afirma que o digestor anaeróbico de fluxo ascendente (UASB), em inglês *Upflow anaerobic sludge blanket*, tem sido amplamente utilizado, tanto para tratar o esgoto industrial quanto para o doméstico, devido às diversas vantagens, como:

- baixo custo de operação e manutenção;
- possibilidade de tratamento águas residuárias provenientes de diferentes origens, o que permite operar os reatores em altas cargas orgânicas;
- possibilidade de produção de energia, se a DQO do efluente for alta (maior que 2300 mg / L).

Os reatores UASB são unidades de tratamento anaeróbico que se destinam fundamentalmente à remoção de matéria orgânica carbonácea em suspensão ou dissolvida nas águas residuárias (LOBATO, 2011). O processo ocorre de acordo com as seguintes etapas: o efluente que chega a um distribuidor central é encaminhado por dutos para o fundo do reator. O efluente, então, sobe lentamente pelo manto de lodo, onde ocorre a remoção e a conversão dos sólidos em outros subprodutos. O biogás produzido na digestão anaeróbica segue para o defletor de gases, na parte superior do compartimento de decantação, como pode ser visto na figura 3 (CHERNICHARO, 2007).

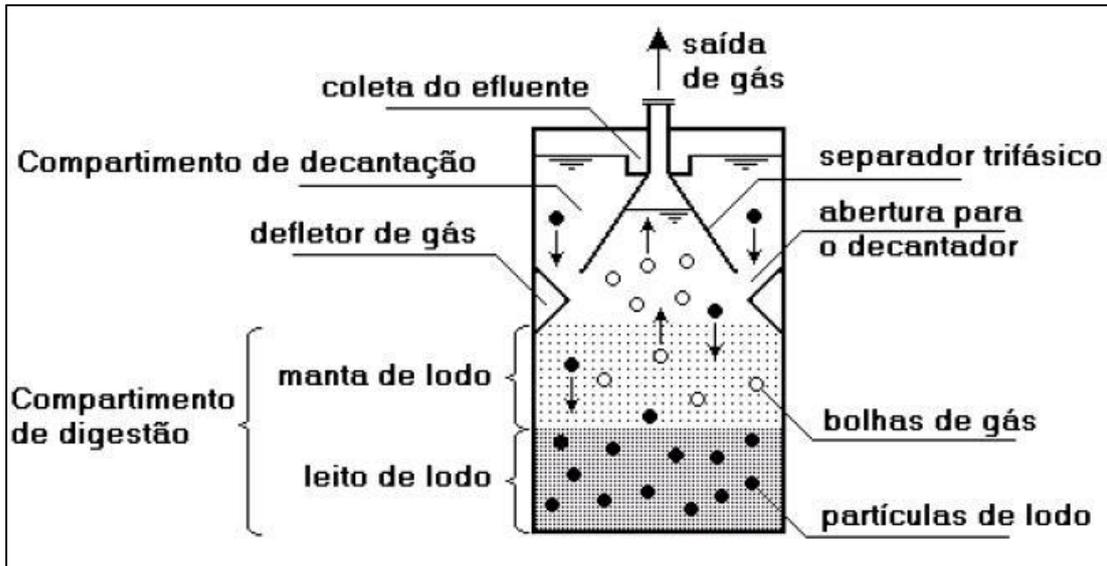


Figura 3 - Esquema de tratamento anaeróbico do reator UASB.

Fonte: Chernicharo (2007).

Outra característica importante nos reatores UASB é a sua capacidade de desenvolver e manter um lodo de elevada atividade e excelente condição de sedimentação. O desenvolvimento do lodo anaeróbico é resultante da formação da matéria orgânica no sistema. Como o crescimento é contínuo, há uma necessidade periódica do descarte de uma parcela do volume de lodo acumulado, sob pena do processo perder eficiência de remoção da carga orgânica do efluente (CHERNICHARO, 1997; METCALF e EDDY, 2003).

As principais reações bioquímicas que ocorrem no processo de reação anaeróbia dentro do reator podem ser divididas em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, cetogênese e metanogênese, conforme apresentadas na Figura 4.

Na primeira etapa (1), denominada acidogênese em decorrência da atividade das bactérias fermentativas acidogênicas, o material orgânico particulado presente no esgoto doméstico é hidrolisado, e os produtos solúveis dessa primeira etapa (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos) são fermentados em ácidos orgânicos (principalmente acético, butírico e propiônico), alcoóis e compostos minerais ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ). Na segunda etapa (2), denominada acetogênese, os microrganismos acetogênicos convertem compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em substratos apropriados para os microrganismos metanogênicos, como

acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Na terceira etapa (3), denominada metanogênese, o acetato e o hidrogênio produzidos nas etapas anteriores são convertidos em metano e dióxido de carbono, pelas bactérias metanogênicas (ZUPANČIČ e GRILC, 2012; CHERNICHARO, 2007).

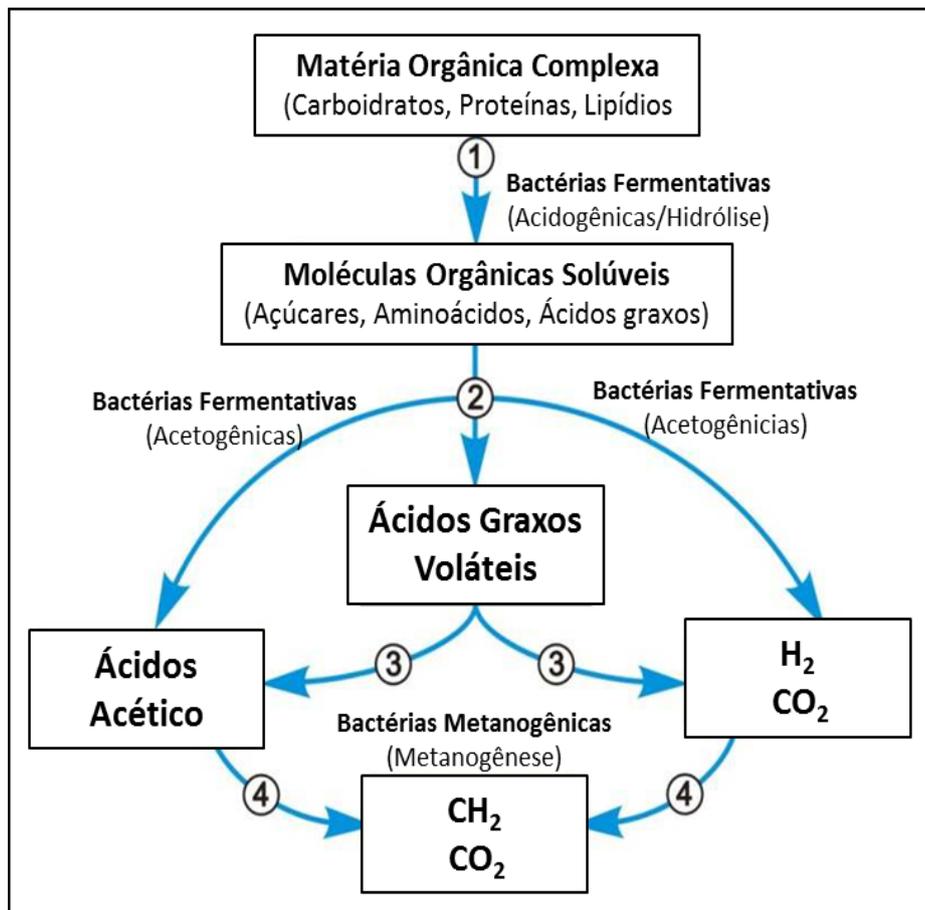


Figura 4 - Sequências metabólicas da digestão anaeróbica.

Fonte: adaptado de Zupančič e Grilc (2012).

Especificamente em efluentes industriais, oriundos de matadouros, de indústrias têxteis, de café, de óleo de oliva e de usinas de açúcar, obtiveram-se ótimos resultados de remoção da matéria orgânica com utilização dos reatores do tipo UASB (ERSAHIN *et al.*, 2011), conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Tratamento anaeróbico para diferentes efluentes industriais.

<b>Tipo de Efluentes</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>Carga Orgânica KgDQO/m³.dia</b>	<b>DQO removida (%)</b>	<b>Produção Metano m³/KgDQO</b>
Matadouro	-	2,10	80	-
Têxtil	-	3,00	82	-
Café	35	0,005	78	0,290
Óleo de Oliva	37	17,80	76	-
Usina de Açúcar	33 - 36	16,00	90	0,355

Fonte: Adaptado de Ersahin *et al.* (2011).

Estudos realizados por El-Gohary e Nasr (1999) apresentaram resultados favoráveis na utilização de reatores do tipo UASB no tratamento de águas residuárias de indústrias confeitarias. Os resultados mostraram que o sistema UASB, com um TDH de 12 horas e carga orgânica de 4,4 kg DBO/m³.dia, alcança uma eficiência de remoção de DQO e DBO de 92,4% e 91,5%, respectivamente.

Essa boa eficiência também foi confirmada por Ersahin et Al. (2008), que avaliaram o desempenho do tratamento de uma das principais indústrias confeitarias da Turquia. Os estudos contemplaram um reator do tipo EGSB (*expanded granular sludge bed*) com volume de 1.200 m³, vazão de efluente de 250 m³/dia e DQO de 3.965 Kg/dia. Nessas condições, foram obtidos 91% de eficiência de remoção de DQO, gerando uma produção de biogás de 1850 ± 640 m³/ dia. Os mesmos autores afirmam que um único reator no processo às vezes é insuficiente para atender ao tratamento de efluentes com altas cargas de DQO, sendo necessário complementar com um sistema aeróbico para que as emissões atinjam os níveis legais. Veja na Figura 5 o fluxo de tratamento da empresa analisada.

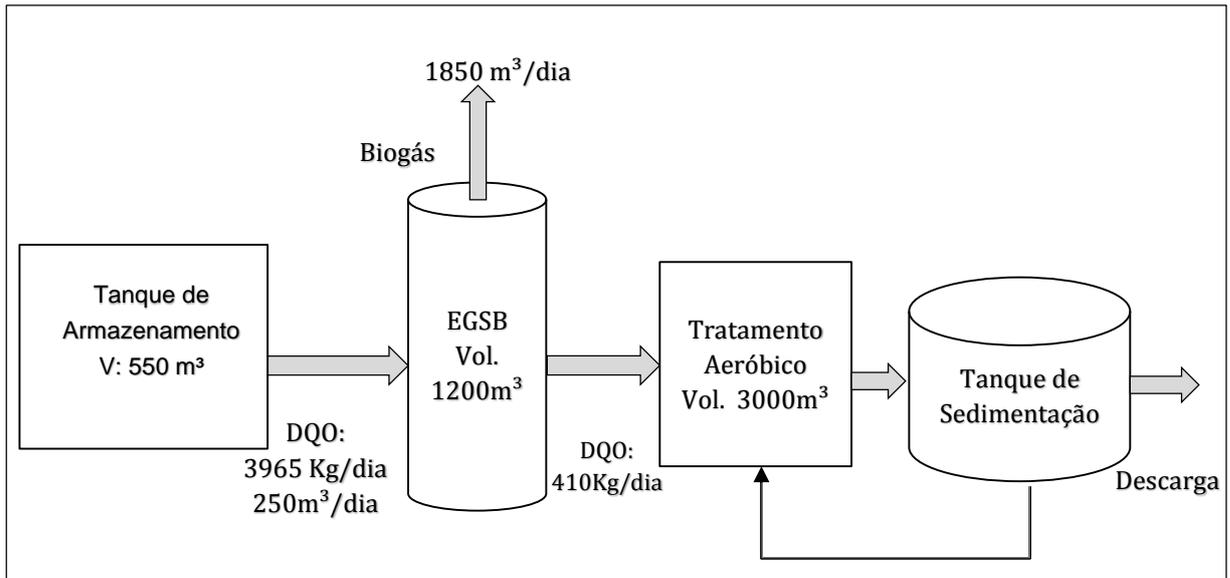


Figura 5 - Balanço de massa para uma planta da indústria de confeitaria.

Fonte: Adaptado de Ersahin et Al. (2008)).

Como acontece com todos os processos biológicos, as condições ambientais são essenciais para manutenção da vida dos microrganismos durante o processo de digestão anaeróbica. O processo de metabolismo microbiano depende de muitos parâmetros, portanto, deve ser considerado e cuidadosamente controlado na prática, conforme apresentado na Tabela 4. Além disso, as exigências ambientais das bactérias acidogênicas diferem das exigências das bactérias metanogênicas, sendo que estas últimas devem ser consideradas como um organismo que exige um longo tempo para regeneração e crescimento (ZUPANČIČ e GRILC, 2012; CHERNICHARO, 1997; VILLELA e FORESTI, 1997).

Tabela 4 - Requisitos ambientais para o metabolismo microbiano

Parâmetros	Acidogênese	Metanogenese
Temperatura	25-35°C	Mesófilas: 30-40°C Termófilas: 50-60°C
pH	5,2-6,3	6 – 7
C:N	10:45	20:30
C:N:P:S	500:15:5:3	600:15:5:3

Fonte: adaptado de Zupančič e Grilc (2012).

Dentre os fatores ambientais, o controle do pH é importante e limitante no crescimento microbiano. Se não for realizado um controle do pH durante a operação de um sistema anaeróbico, há um grande risco de inibição das bactérias. Conforme Chernicharo (2007) e Metcalf & Eddy (2003), as bactérias presentes na hidrólise, acidogênese e acetogênese têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 5,0 e 6,0 e as bactérias metanogênicas têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4. Para tanto, o pH no reator deve estar na faixa de 6,6 e 7,8. Qasim (1998) observou em seus estudos que um pH abaixo de 6,2 gera impacto na produção de metano devido ao acúmulo de ácidos, podendo paralisar o sistema.

A temperatura é um dos fatores que mais influenciam na seleção das espécies na digestão anaeróbia, pois afetam o processo de estabilização da matéria orgânica, a velocidade do metabolismo das bactérias, o equilíbrio iônico e a solubilidade do substrato (METCALF e EDDY, 2003). Os estudos realizados por Esparza-Sato *et al.* (2013), nos quais avaliam o desempenho em escala piloto de um reator anaeróbico do tipo UASB de águas residuárias da indústria de chocolate em baixas temperaturas (18°C), demonstraram uma baixa produção de biogás e da eficiência no tratamento (59%-78%). Verificou-se uma produção de biogás em relação a DQO removida de 0,082 m<sup>3</sup>/KgDQO, comparando com resultados encontrados por Chernicharo (2007) que, em efluentes domésticos e condições normais de temperatura e pressão, obteve uma produção biogás de 0,35m<sup>3</sup>/KgDQO. Portanto, nota-se que a temperatura teve grande influência na produção de biogás.

A inibição das atividades microbianas é bastante acentuada para efluentes contendo 100 mg/L de lipídeos, podendo afetar a produção de biogás. Experimentos realizados demonstram que a produção do gás metano foi nula para valores acima de 500 mg/L de lipídeos. Para este cenário, estudos indicam a utilização da enzima lipase para aumentar a eficiência do processo, permitindo uma redução dos níveis de sólidos suspensos, lipídeos e proteínas, o que possibilita melhores condições de operação no tratamento anaeróbico, além da desobstrução de filmes de óleos em tubulações, resultando no aumento da vida útil dos equipamentos (MENDES, *et al.*,2005).

Nessas condições ambientais, ocorre a produção do biogás, que dependerá dos fatores citados anteriormente e do nível de matéria orgânica no sistema. Esse gás é

considerado uma fração dessa carga orgânica degradável dos efluentes (EI-FADEL e MASSAOUD, 2001).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

Produto da digestão anaeróbica dos resíduos orgânicos, o biogás assume um papel importante como fonte alternativa de energia no mundo. Vários estudos foram realizados, buscando o desenvolvimento de tecnologias para intensificar a produção e, principalmente, constatar sua capacidade energética em suas diversas origens e aplicações (BEAL e RAMAN, 2000; MAKAREVICIENE, 2013; JENSEN e GOVINDAN, 2014). Neste contexto, o Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO, 2007) afirma que o biogás, além de ser renovável e um subproduto da degradação de um resíduo, apresenta outras vantagens, como a geração de energia próxima aos pontos de consumo, a possibilidade de venda de eletricidade à rede e a redução das emissões de metano para a atmosfera. Promove também a economia no processo de tratamento de esgoto, aumentando a viabilidade da implantação de serviços de saneamento básico, redução do consumo de combustíveis fósseis, entre outros.

Os constituintes usualmente presentes no biogás gerado nos tratamentos anaeróbicos de efluentes domésticos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbicos de efluentes domésticos

Metano (CH <sub>4</sub> )	%	60 -85
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	%	5-15
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	%	10-25
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	%	Traços
Ácido sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	ppm	1000-2000
Monóxido de Carbono (CO)	%	0-0,3
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	%	0-0,3

Fonte: adaptado de Rasi *et al.* (2011); Noyola *et al.* (2006).

O biogás de reatores UASB é geralmente composto por alto teor de metano (70 a 80 %) e por gás carbônico em menor concentração, podendo chegar à taxa de aproximadamente  $0,355 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg}$  de DQO removida (VANHAANDEL, 1987; PAUSS, et al., 1987). Observa-se também que a composição de biogás varia de acordo com as características do efluente, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos

<b>Autor</b>	(IANNICELLI, 2008)	(PECORA, 2006)
<b>Parâmetros</b>	<b>Cervejaria</b>	<b>Doméstico</b>
Metano (%)	84,180	75,80
Dióxido de Carbono (%)	15,207	4,75
Nitrogênio (%)	0,586	15,50
Oxigênio (%)	0,026	1,23

Estudos realizados por Iannicelli (2008) em uma indústria de cervejaria verificaram uma geração de  $90.000 \text{ m}^3/\text{mês}$  de biogás, apresentando em sua composição 84,18% de  $\text{CH}_4$ , 15,207% de  $\text{CO}_2$ , 0,586% de  $\text{N}_2$  e 0.026% de  $\text{O}_2$ . Os efluentes da indústria de cervejaria são basicamente de formação orgânica que, de forma geral, é facilmente biodegradável e consiste em açúcares, amido solúvel, etanol, ácidos voláteis, etc.

De acordo com Lima (2005), para utilização do biogás na produção de energia (térmica ou elétrica), a composição ideal do metano deve estar na faixa de 50% a 80%. Isso ocorre em função do alto poder calorífico do metano, ou seja, quanto maior a sua concentração, maior será seu poder calorífico inferior (PCI), que pode variar de 4.300 a  $8.500 \text{ Kcal/Nm}^3$ , conforme observado na Figura 6.

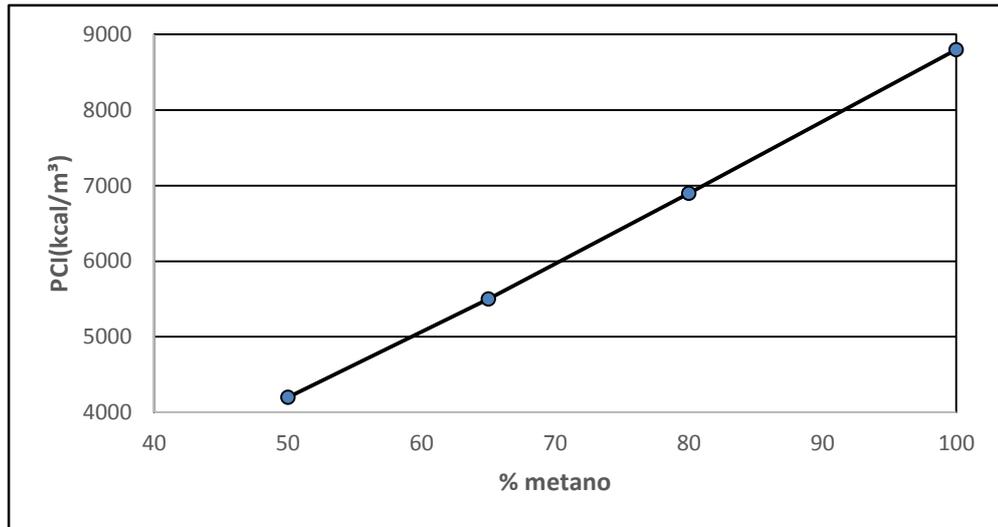


Figura 6 - Poder calorífico inferior em função do percentual de metano.

Fonte: adaptado de (LIMA, 2005).

Observa-se, na Tabela 7, a comparação entre o PCI de vários tipos de gases. O metano destaca-se por ter um poder calorífico próximo ao do gás natural de petróleo. Por sua vez, o biogás pode atingir cerca de 5.500 Kcal/m<sup>3</sup> para uma concentração de metano de 60% (PAUSS, *et al.*, 1987).

Tabela 7 - Comparação do PCI do biogás com outros gases.

<b>GÁS</b>	<b>PCI (kcal/m<sup>3</sup>)</b>
Metano	8500
Propano	22000
Butano	28000
Gás de Coqueria	4400
Gás de Cidade	4000
Gás Natural	8554
Biogás	5500

Fonte: adaptado de Pauss, *et al.* (1987).

É interessante verificar a equivalência energética do biogás, demonstrando seu alto poder calorífico. Na Tabela 8, são apresentados valores da equivalência energética desse gás, comparando-o a outros combustíveis. Por exemplo, pode-se observar que 1 m<sup>3</sup> de biogás é equivalente a 6,5 Kw/h de eletricidade (AVELLAR, 2001).

Tabela 8 - Equivalência energética do biogás

<b>1 m<sup>3</sup> de biogás = 5500 kcal, é equivalente a:</b>	
1,7 m <sup>3</sup> de metano	0,25 m <sup>3</sup> de propano
0,8 L de gasolina	1,30 L de álcool
2 kg de carboneto de cálcio	0,70 L de óleo
6,5 Kw/h de eletricidade	2,7 kg de madeira
1,4 Kg de carvão de madeira	0,2 m <sup>3</sup> de butano

Fonte: adaptado de Avellar (2001).

No entanto, a utilização do biogás dependerá da sua qualidade para cumprir os requisitos das tecnologias existentes, como: caldeiras, motorgeradores, veículos e injeção na rede de gás, conforme apresentado na Tabela 9. Observa-se que, para algumas tecnologias, podem ser exigidas restrições ou não, ou ainda ser necessário tratamento para a remoção de impurezas antes da utilização.

Tabela 9 - Restrição e remoção de impurezas para utilização do biogás

<b>Aplicação</b>	<b>H<sub>2</sub>S</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>
Uso direto para geração de calor (ex. combustível para caldeiras e aquecedores)	<1000 ppm	Nenhum tratamento	Tratamento Parcial
Cogeração de eletricidade e calor a partir de motores de combustão interna	<1000 ppm Tratamento parcial a completo	Nenhum tratamento	Tratamento completo
Combustível Veículo	Tratamento completo (H <sub>2</sub> S < 1000-2000 mg/m <sup>3</sup> )	Tratamento completo	Tratamento completo (umidade < 70-80%)
Rede de Gás	Tratamento completo (H <sub>2</sub> S < 5 mg/m <sup>3</sup> )	Tratamento completo (CH <sub>4</sub> ≥ 95%)	Tratamento completo (umidade < 70-80%)

Fonte: adaptado de Appels, *et al.* (2008); Chambers e Potter (2000).

Entre as impurezas do biogás, destaca-se o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ). Estudos realizados em estações de tratamento de esgoto (ETE) demonstram diferentes resultados para a concentração de  $H_2S$  no biogás. Em uma ETE na Espanha, Osório e Torres (2009) verificaram valores acima de 1000 ppm, devido ao alto teor de sulfatos nos efluentes. Em uma ETE em Nova York, nos EUA, as concentrações de  $H_2S$  foram inferiores a  $62,9 \pm 40,3$  ppm. Em quatro digestores na Finlândia, as concentrações atingiram valores inferiores a 4 ppm, pois utilizava-se  $FeSO_4$  para precipitar o fósforo do efluente, aumentando a precipitação de  $H_2S$  no digestor (SPIEGEL e PRESTON, 2003)

Outro contaminante típico do biogás, proveniente de ETEs é a siloxina. Sua presença causa a formação de grãos de sílica no interior de equipamentos (motores e turbinas), o que, com o decorrer do tempo, pode gerar problemas (CAPSTONE, 2013). Outros potenciais contaminantes que necessitam ser eliminados são sólidos, umidade e bactérias que podem estar presentes (SPIEGEL e PRESTON, 2000)

O aproveitamento energético do biogás depende fundamentalmente de suas características, sendo que a composição química viabilizará ou limitará sua aplicabilidade, impondo um nível de qualidade. Várias técnicas estão disponíveis para a remoção das impurezas do biogás, porém as exigências de qualidade variam de acordo com as aplicações, por isso o planejamento é essencial para determinar a implantação de um projeto nesta área (RASI, *et al.*, 2011).

### 3.4 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO E BIOGÁS

Um dos métodos bastante utilizado para estimar o potencial de produção de metano foi desenvolvido pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*). Esse método avalia as emissões de gás carbônico ( $CO_2$ ) para projetos de recuperação e utilização do metano produzido pelo tratamento de efluentes, em acordo com o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Para projetos de pequena escala, definidas pela UNFCCC (2012), considera-se projetos que recuperem o biogás a partir de matéria orgânica nas águas residuais designada no documento AMS III.H. As emissões de linha de base de acordo com a AMS III.H estão relacionadas às emissões de metano dos sistemas de tratamento de esgoto atuais que serão equipados com sistemas de recuperação de metano para um cenário previsto em um projeto.

As emissões de totais de CO<sub>2</sub> para as atividades relacionadas aos projetos de recuperação de metano são calculadas conforme equação 3.

$$BE_y = BE_{y, power} \times BE_{ww, y, trat} \times BE_{s, y, trat} \times BE_{ww, discharge, y} \times BE_{final, y} \quad 3$$

Sendo,

BE<sub>y</sub>: Emissões de linha de base no ano y (tCO<sub>2</sub>);

BE<sub>y, power</sub> : Emissões de linha de base a partir de eletricidade ou de consumo de combustível no ano y (tCO<sub>2</sub>);

BE<sub>ww,y, trat</sub> : Emissões de linha de base dos sistemas de tratamento de esgoto afetados pela atividade do projeto no ano (tCO<sub>2</sub>);

BE<sub>s,y, trat.</sub> : Emissões de linha de base dos sistemas de tratamento de lama afetados pela atividade do projeto no ano y (tCO<sub>2</sub>);

BE<sub>ww,discharge,y</sub> : Emissões de metano de linha de base a partir do carbono orgânico degradável em esgoto tratado descarregado no mar/rio/lago no ano y (t CO<sub>2</sub> eq). O valor desse termo é zero no caso da introdução do sistema de tratamento anaeróbio de lama com recuperação de biogás e combustão em uma estação existente de tratamento de esgoto sem tratamento de lama.

BE<sub>s, final,y</sub> : Emissões de metano de linha de base a partir da decomposição anaeróbia da lama final produzida no ano y (tCO<sub>2</sub>). Se a lama for controlada, queimada com combustível, descartada em um aterro sanitário com recuperação do biogás, ou utilizada para aplicação no solo no cenário de linha de base, esse termo será negligenciado.

Especificamente para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> nos sistemas de tratamento de esgoto, leva-se em consideração o potencial de geração de metano, conforme equação 4.

$$BE_{www,y,trat} = \sum Q_y \times COD_{rem} \times \eta_{rem} \times MCF_{trat} \times B \times UF \times GWP_{CH_4} \quad 4$$

$BE_{www,y,trat}$ : emissões de metano de carbono orgânico degradável em esgoto tratado descarregado (tCO<sub>2</sub>e);

$Q_y$ : Volume do esgoto tratado em sistema de tratamento de esgoto de linha de base *i* no ano *y* (m<sup>3</sup>/ano);

$COD_{rem}$ : Demanda Química de Oxigênio removida por sistema de tratamento de linha de base *i* no ano *y* (t/m<sup>3</sup>), medida como a diferença entre a COD de entrada e COD de saída no sistema;

$\eta_{rem}$  = eficiência de remoção da DQO das águas residuárias;

$MCF_{trat}$ : Fator de correção de metano para sistema de tratamento de esgoto;

$B$ : Capacidade de produção de metano do esgoto;

$UF$ : Fator de correção de modelo para contabilizar incertezas do modelo (0,94);

$GWP_{CH_4}$ : Potencial de Aquecimento Global para o metano (valor 21);

A equação 4 contempla o fator de conversão do metano (GWP) em CO<sub>2</sub>, considerando que cada tonelada de CH<sub>4</sub> emitido tenha equivalência a 21 toneladas de CO<sub>2</sub>. Desta forma, para estimar somente a produção de metano (tCH<sub>4</sub>/ano), desconsidera-se esse fator, conforme apresentado na equação 5. (SHOW e LEE, 2008; GERVASONI e CANTÃO, 2011; UNFCCC, 2012).

$$P_{CH_4} = Q \times S_0 \times \eta_{rem} \times FP_{CH_4} \times FCM \times FCI \quad 5$$

Onde:

$P_{CH_4}$  = produção de metano de uma ETE (t/ano);

$Q$  = volume de águas residuárias tratadas ( $m^3$ /ano);

$S_0$  = concentração de demanda química de oxigênio total (DQO<sub>T</sub>) das águas residuárias, (t/ $m^3$ );

$\eta_{rem}$  = eficiência de remoção da DQO das águas residuárias;

$FP_{CH_4}$  = fator de produção do metano, igual a 0,25 t  $CH_4$ /t DQO (IPCC, 2006);

FCM = fator de correção do metano em função do tipo de tratamento (Tabela 13);

FCI = fator de correção devido às incertezas, igual a 0,89 (UNFCCC, 2012).

Os valores do fator de produção de metano ( $FP_{CH_4}$ ) e do fator de correção devido às incertezas (FCI) são obtidos no guia para inventários de gases de efeito estufa do IPCC (Painel Intergovernamental para Mudança Climática) (IPCC, 2006).

De acordo com o IPCC (2006), a capacidade máxima de produção teórica de  $CH_4$  em termos de DQO removida é de 0,25 t  $CH_4$ /t DQO. A abordagem teórica para o fator de produção de metano ( $FP_{CH_4}$ ) pressupõe que toda fração orgânica removida anaerobicamente é convertida em  $CH_4$ , sendo baseada na reação global estequiométrica para metanogênese em que os principais reagentes são a fração orgânica e a água, e os principais produtos incluem o  $CH_4$  e o  $CO_2$ . Entretanto, essa estimativa simplificada do complexo processo de degradação anaeróbica não leva em consideração inúmeros fatores, incluindo o grau de decomposição, as limitações de nutrientes, a inibição biológica e as interações físico-químicas (EL-FADEL e MASSOUD, 2001). Já o fator de correção (FCM) varia de 0 a 1, de acordo com a via de tratamento e/ou destinação final, conforme apresentado na Tabela 10. Para reatores UASB sem recuperação do  $CH_4$ , este valor é igual a 0,8, indicando que, nesses sistemas de tratamento, as emissões correspondem a 80% do fator de produção de metano ( $FP_{CH_4}$ ).

Tabela 10 - Fator de correção em função do sistema de tratamento ou sistema de descarga

<b>Tipo de Tratamento</b>	<b>FCM</b>
Descarga das águas residuárias do mar, rios ou lagos.	0,1
Tratamento aeróbico, operando precariamente ou com sobrecarga.	0,3
Reator anaeróbico sem recuperação de metano	0,8
Lagoa anaeróbica rasa (profundidade inferior a 2 m)	0,2
Lagoa anaeróbica rasa (profundidade superior a 2 m)	0,8
Sistema séptico	0,5

Fonte: adaptado de IPCC (2006).

De acordo com Gervasoni e Cantão (2011), o resultado obtido com esse método não considera o metano dissolvido no efluente. Em seus estudos, verificou que o resultado teórico obtido na ETE de Atuba Sul no Paraná foi superior ao da medição realizada na saída do reator UASB em 20%, isso se justifica pela perda de 34% do total de metano produzido que se encontrava dissolvido no efluente. Assim, essa perda deve ser considerada para corrigir os resultados obtidos com o método.

De acordo com Haandel e Letting (1994), as perdas de metano no efluente em reatores UASB podem variar de 20 a 50%, devido à saída de metano dissolvido no efluente e também como resultado da transferência deste gás da superfície do reator para a atmosfera; já Agrawal *et al.* (1997) as quantificaram em cerca de 50%. Esses autores observaram que as perdas de metano dissolvido no efluente são maiores em sistemas com baixos tempos de detenção hidráulica. Salienta-se que essas perdas não apenas representam uma diminuição no potencial energético, mas também contribuem com a emissão de gases de efeito estufa (LOBATO, 2011).

Nos sistemas anaeróbicos, do total de matéria orgânica que entra no sistema, cerca de 50 a 80% é convertida em biogás, do qual pode ser aproveitado o potencial energético do metano (CH<sub>4</sub>). O material não convertido em biogás ou biomassa sai do reator como material não degradado (10 a 30%), conforme apresentado na Figura 7 (CHERNICHARO, 2007).

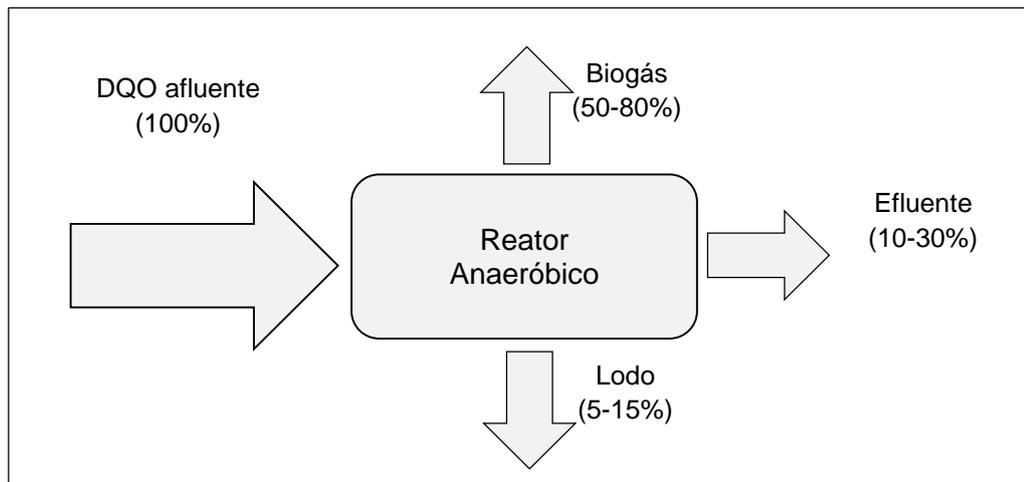


Figura 7 – Rotas de conversão de matéria orgânica.

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

A produção total de biogás a partir da produção e concentração de metano (CH<sub>4</sub>) pode ser calculada de acordo com Equação 5. Para tratamento de efluentes domésticos, pode-se considerar uma concentração de metano de 60 a 85% (RASI, *et al.*, 2011).

$$P_{Biogas} = \frac{P_{CH_4}}{C_{CH_4}}$$

5

Onde,

$P_{Biogás}$ : Produção de biogás (t/ano);

$P_{CH_4}$ : Produção de metano de uma ETE, em t/ano;

$C_{CH_4}$ : Concentração de metano.

### 3.5 RECUPERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

Os investimentos em energia renovável apresentam, em sua maioria, custos superiores aos das fontes tradicionais. Porém, invariavelmente, as energias renováveis trazem consigo fatores positivos passíveis de serem mensurados nas áreas econômicas, ambientais e sociais. Especificamente, investimentos em biogás como fonte combustível para geração de energia podem ser viáveis economicamente devido à apropriação de receitas oriundas da venda da energia elétrica, à substituição de combustíveis fósseis e à comercialização dos créditos de carbono (PNUD, 2010).

O aproveitamento energético do biogás promove a utilização de recursos renováveis, colaborando com a não dependência de fontes de energia fóssil; aumenta a oferta e possibilita a geração descentralizada de energia próxima aos centros de carga; promove a economia no processo de tratamento de esgoto, aumentando a viabilidade para implantação de serviços de saneamento básico (PNUD, 2010). As principais vantagens e desvantagens da utilização do biogás provenientes de ETE's são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Vantagens e desvantagens da utilização do biogás

<b>VANTATENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de fonte renovável;</li> <li>▪ Redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária, e, em decorrência, de custos;</li> <li>▪ Possibilidade de processos de cogeração;</li> <li>▪ Redução das emissões de metano para a atmosfera;</li> <li>▪ Venda de Créditos de carbono;</li> <li>▪ Maior controle de maus odores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Escassez de tecnologias nacionais de geração de energia a partir do biogás;</li> <li>▪ Em geral, a utilização do biogás demanda a retirada de constituintes, como o H<sub>2</sub>S;</li> <li>▪ O biogás é um gás leve e de baixa densidade, de difícil liquefação, o que dificulta seu transporte e armazenamento.</li> </ul>

Fonte: adaptado de Salomon e Lora (2005).

O biogás pode ser utilizado na produção de calor e vapor de água, geração de energia elétrica ou cogeração, uso como combustível de veículos, entre outras (APPLEL et al., 2008). Algumas das principais alternativas para gerenciamento do biogás foram classificadas de acordo com a Figura 8.

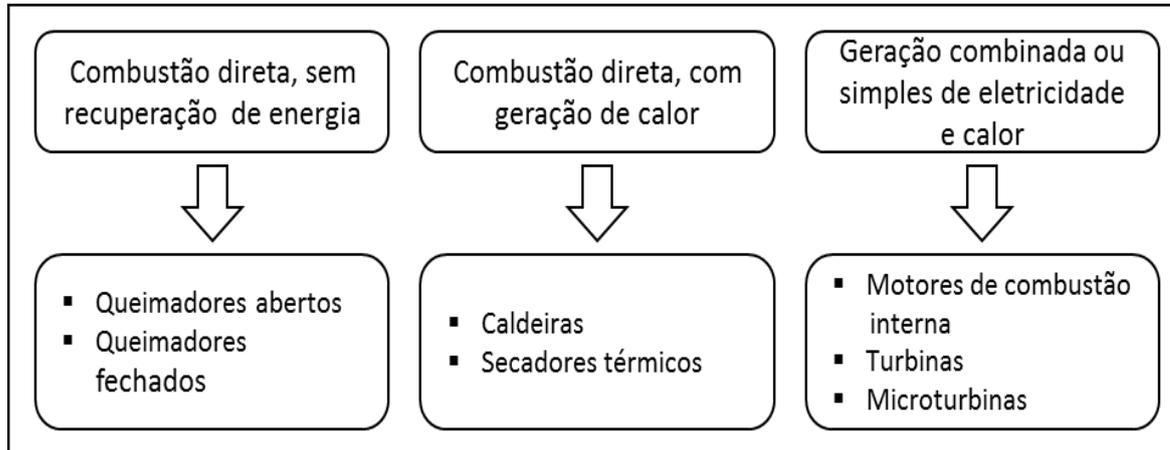


Figura 8 - Classificação de algumas das principais alternativas para aproveitamento do biogás.

Fonte: adaptado de Lobato (2011).

A *combustão direta sem recuperação de energia* é realizada através de queimadores que são, basicamente, dispositivos que possibilitam a ignição e a queima de gases. Embora o uso de queimadores não possibilite o aproveitamento energético do biogás, ainda assim essa alternativa deve sempre existir nos locais em que é gerado o biogás, por motivo de segurança (evitar possíveis explosões), para o controle de odores e por razões ambientais (ALM et al., 2011).

A *utilização do biogás como combustão direta com recuperação de calor* é o método mais simples e mais eficiente de recuperar energia do biogás, uma vez que mais de 80% do valor calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil. De acordo com estudos da EPA (*Environmental Protection Agency*), esse tipo de uso de biogás respondeu por cerca de 1/3 de todos os projetos de recuperação de energia nos Estados Unidos da América em 2008 (USEPA, 2009).

Uma das formas de combustão direta é a utilização do biogás em caldeiras. O princípio de funcionamento deste equipamento ocorre pela transferência de energia de um combustível para a água ou outro fluido contido no interior de uma câmara fechada.

O fluído aquecido ou vaporizado é utilizado em vários processos ou aplicações de aquecimento, seja na forma estacionária (a exemplo de residências e indústrias) ou móvel (como no caso do fornecimento de vapor para a movimentação de trens e embarcações) (JENSEN e GOVINDAN, 2011; USEPA, 2009).

A fonte de calor para uma caldeira é a combustão de qualquer tipo de combustível, como madeira, carvão, petróleo ou gás natural. A utilização do biogás em caldeiras, em substituição a um combustível convencional, como o gás natural, óleo combustível ou o carvão, é uma prática utilizada nas empresas dos Estados Unidos da América (EUA) há mais de 25 anos (USEPA, 2009).

A queima do biogás é similar à queima de um gás natural diluído, porém devem ser observadas algumas considerações sobre a combustão direta em caldeiras, a fim de assegurar o funcionamento adequado do sistema. Se o combustível é uma mistura de gás natural e biogás, são necessárias pequenas adaptações na caldeira. Ao contrário, se o biogás é o combustível predominante ou o único combustível, são necessárias maiores modificações para se compensar o menor conteúdo energético do biogás, em comparação ao gás natural. Como o biogás apresenta um valor calorífico inferior ao do gás natural, o volume de biogás utilizado na caldeira será maior do que o do gás natural. Com isso, haverá a necessidade de modificação do sistema de alimentação e de queima de combustível na caldeira, de modo a possibilitar o processamento de uma vazão maior de gás e garantir um valor calorífico equivalente ao do gás natural. Todavia, tais adaptações não interferem significativamente no projeto e na operação dos componentes da caldeira (USEPA, 2009; JENSEN e GOVINDAN, 2011).

O biogás é amplamente utilizado para a queima em caldeiras em diversas indústrias. Estudos realizados por Jensen e Govindan (2014) demonstraram que, a utilização de biogás gerado no tratamento de efluentes em uma indústria panificadora, pode ser viável quando queimado em caldeiras para geração de vapor. Porém, os investimentos dependem das políticas de incentivo e dos custos de implantação do projeto. Outro estudo em caldeiras ocorreu em uma indústria de cerveja no Canadá, onde obteve-se um ótimo retorno do investimento, recuperado em cinco anos, e a redução no consumo de GN em 9,8%. O biogás gerado nessa indústria possui cerca de 77,8% de CH<sub>4</sub> e 0,3-0,6 ppm de H<sub>2</sub>S. Mesmo com o teor de H<sub>2</sub>S considerado baixo,

foi utilizado um filtro de carvão ativado e limalha de ferro, conseguindo 99,5 % de eficiência na remoção dessa impureza, com um custo de instalação do sistema de purificação de US \$ 3.000 (ALM *et al.*, 2011).

Um problema relacionado à utilização do biogás em caldeiras é a possível corrosão da estrutura do equipamento, proporcionada pela umidade e pelo ácido sulfídrico. Desta forma, tornam-se necessárias algumas medidas preventivas, como o revestimento do pré-aquecedor e da chaminé com material anticorrosivo ou a substituição por materiais resistentes à corrosão (ex.: aço inoxidável); o controle da temperatura dos gases de exaustão e a circulação adequada da água podem reduzir os efeitos corrosivos. Os níveis de umidade do biogás devem ser controlados com a instalação de purgadores e linhas de condensado para impedir danos aos equipamentos e problemas operacionais nas caldeiras. A instabilidade da chama, decorrente das flutuações na vazão de biogás, pode ser controlada com a instalação de sensores ultravioletas que monitoram a chama impedindo que ela se apague, ou com o uso de um sistema de combustível auxiliar, funcionando como reserva em situações de variação na vazão de biogás (USEPA, 2009; ALM *et al.*, 2011).

*A geração combinada ou simples de eletricidade e calor* consiste no aproveitamento local do calor residual originado nos processos termodinâmicos de geração de energia elétrica, que, de outra forma, seria desperdiçado. O aproveitamento pode se dar sob a forma de vapor, água quente e/ou fria para uma aplicação secundária. Através da cogeração, é possível aproveitar o calor perdido no processo de transformação da energia de um combustível em eletricidade, aumentando a eficiência energética do processo (USEPA, 2009).

Das tecnologias disponíveis para a geração de energia elétrica utilizando o biogás, destacam-se as turbinas a gás e os grupos de geradores de combustão interna. Ambas têm o papel de transformar a energia química do gás em energia mecânica que impulsionará um alternador para a conversão em energia elétrica (COSTA, 2006).

Os motores de combustão interna (Ciclo Otto) e as microturbinas a gás geram energia elétrica pela conexão de um gerador ao motor (ICLEI, 2010). O consumo de biogás para geração de eletricidade em motores ciclo-Otto e em microturbinas é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Consumo de biogás para geração de energia elétrica

<b>Equipamento</b>	<b>Potência</b>	<b>Rendimento</b>	<b>Consumo de Biogás (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Consumo de Biogás (m<sup>3</sup>/kWh)</b>
Motor a Gás Ciclo-Otto	30kW	35%	14,74*	0,49*
Microturbina	30kW	27%	19,11*	0,64*

Fonte: Adaptado de (CENBIO, 2004)

(\*) O estudo considera um Poder Calorífico Inferior (PCI) do Biogás de 5.000 kcal/Nm

Como pode ser observado na Tabela 12, a eficiência de geração de eletricidade no motorgerador pode chegar a 35% e nas turbinas em 27%, para um consumo de biogás de 0,49 m<sup>3</sup>/kWh e 0,64 m<sup>3</sup>/kWh, respectivamente. De acordo com Dudek (2010), as taxas viáveis para aproveitamento de biogás em motores variam de 30 a 2000 m<sup>3</sup>/h com 50% de CH<sub>4</sub>.

Estudos realizados por Naja *et al.* (2011) indicam que alguns tipos de biogás podem ser utilizados para injeção nos dutos de gás natural, após processo de purificação. A União Europeia utiliza-se de decretos nacionais para a injeção de biogás nas redes de gás natural, estabelecendo padrões de pureza que devem ser cumpridos (ZUPANČIČ e GRILC, 2012).

Mesmo em condições de baixa produção de biogás, existem tecnologias diversas que podem ser utilizadas para reaproveitamento do biogás. Estudos realizados por Schoena e Bagley (2012) em uma ETE de uma indústria de lã, verificaram uma produção de biogás de 100 m<sup>3</sup>/dia, com emissões de metano em uma faixa de 0,10 a 0,39 m<sup>3</sup>/KgDQO. Com esses resultados, foram realizadas simulações de geração de energia elétrica e térmica, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Tecnologias para geração de energia

<b>Tecnologia de Recuperação</b>	<b>Capacidade Máxima</b>	<b>Energia Recuperável</b>
Caldeira	2,5 hp	2.114 MJ/dia
Microturbina	8 Kw	192 Kwh/dia
Motor a Gasolina	10 Kw	240 Kwh/dia
Turbina a Vapor	6 Kw	144 Kwh/dia
Motor Striling	8 Kw	192 Kwh/dia

Fonte: Adaptado de Schoena e Bagley (2012).



#### 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A fábrica de chocolate em estudo, localizada no estado do Espírito Santo, produz diversos produtos à base de chocolate de forma contínua, podendo sofrer alterações na produção em função da sazonalidade. Possui em sua planta uma unidade de tratamento de esgoto, contemplando um reator de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB- *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) para tratamento das águas residuárias industriais e sanitárias. A empresa BRASMETANO, localizada no estado de São Paulo, foi a responsável pelo projeto e pela instalação desse sistema de tratamento, denominado Sistema Racional de Controle Ambiental (RECS-IW), que teve início de operação em setembro de 2008.

Essa fábrica trata seus efluentes em duas etapas: tratamento anaeróbico e aeróbico. Primeiramente realiza um tratamento anaeróbico dos efluentes em um reator do tipo UASB, seguindo para um sistema aeróbico via membranas, que conclui o tratamento do efluente, de forma a atingir níveis de concentração aceitáveis pela legislação vigente antes da descarga na rede pública. O biogás gerado no tratamento anaeróbico é queimado via *flare* para ser lançado na atmosfera. Na figura 9, pode ser observado o fluxo resumido do processo.

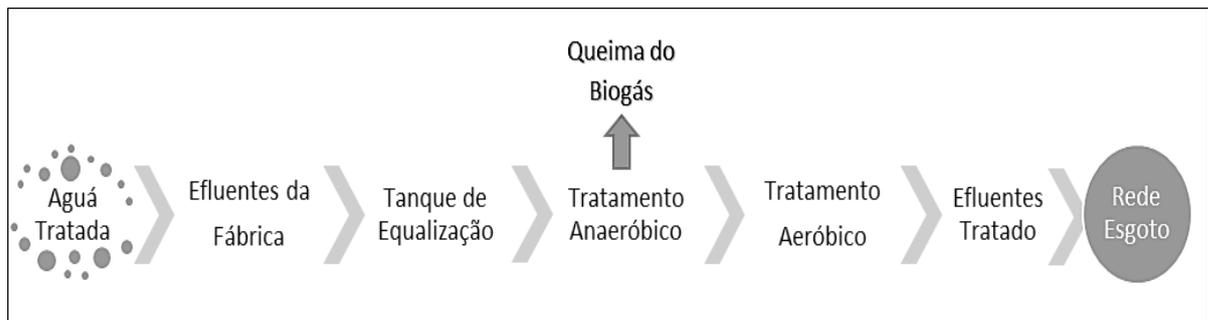


Figura 9: Fluxo resumido do processo de tratamento do efluente de uma fábrica de chocolate

O reator UASB recebe o efluente sanitário de aproximadamente 3.000 funcionários e todo o efluente do processo industrial. Esses efluentes gerados na indústria são recebidos em elevatórias e bombeados para a unidade de remoção de sólidos (*Cleanerflow*) para retirada de sólidos grosseiros. O efluente industrial é direcionado para o equipamento denominado Flomax, o qual tem a função de retirar o excesso de óleos e graxa do efluente.

Em seguida, esse efluente alcança a unidade de padronização (SU) por gravidade, onde são mantidos permanentemente homogêneos juntamente aos efluentes provenientes dos sanitários e do restaurante. A SU tem capacidade para 600 m<sup>3</sup>, porém opera com um volume de 400 m<sup>3</sup>, e, dependendo da vazão do efluente, esse pode permanecer no sistema de 20 a 40 horas de retenção, considerando vazões de 200 a 500 m<sup>3</sup>/dia.

A partir da SU, esses efluentes são elevados pela unidade de alimentação do RECS-IW à unidade de processamento microbiológico (MPU), que tem uma capacidade de 1.000 m<sup>3</sup>. Neste transcurso recebem, se necessário, a correção de pH e nutrientes. Ao alcançar a MPU, os efluentes são distribuídos uniformemente sob uma densa camada de cultura biológica, que metaboliza sob condições estritamente anaeróbicas.

Vencida a camada de lodo biológico, os efluentes alcançam um conjunto múltiplo de separadores de fases, que segregam o lodo suspenso do efluente então processado enquanto um coletor multissegmentado coleta o biogás gerado, levando-o à unidade de queima atmosférica, onde é consumido ininterruptamente. Periodicamente, o excesso de lodo que cresce no interior da MPU é descartado.

Na Figura 9, observa-se a estrutura do reator UASB em estudo, e na Figura 10, todo o fluxo do processo de tratamento anaeróbico da fábrica descrito anteriormente.



Figura 10 - Vista do Reator UASB na Fábrica de Chocolate

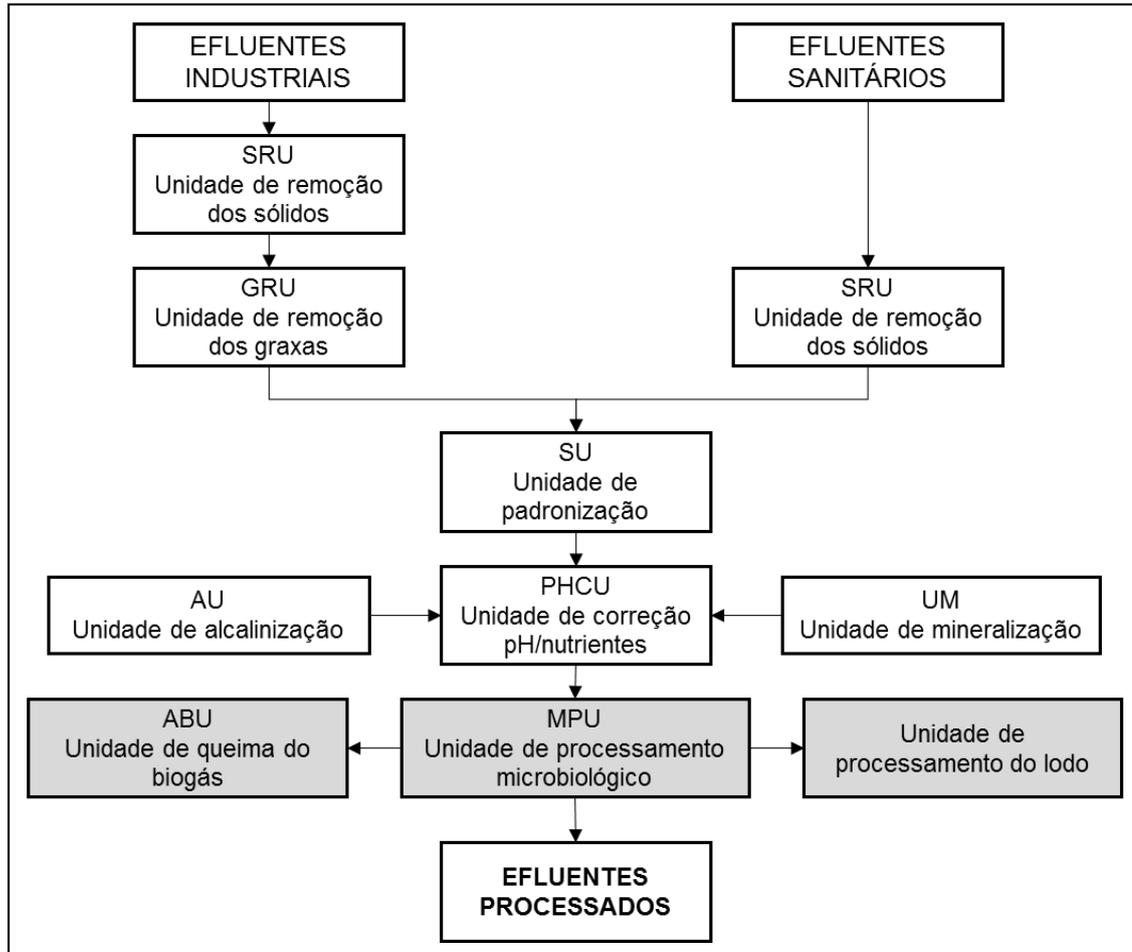


Figura 11- Fluxo de tratamento dos efluentes industriais e sanitários



## 5.1 ARTIGO 1

---

### PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO TRATAMENTO ANAERÓBICO DE EFLUENTES EM UMA FÁBRICA DE CHOCOLATE

#### **Resumo**

O objetivo principal deste artigo foi estimar a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica na unidade de tratamento de águas residuárias de uma fábrica de chocolate. Para isso, foi avaliada a variabilidade dos principais dados amostrais do processo, de forma a utilizá-los nos cálculos de estimativa da produção de biogás, de acordo com o método estabelecido pela Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Os dados amostrais do processo indicaram que os efluentes dessa indústria apresentam uma taxa de emissão de 1,90 KgDQO/t de chocolate, demanda química de oxigênio (DQO) média de 3.054,1 mg/L e 83% de eficiência de remoção. Com esses resultados, verificou-se que o tratamento anaeróbico dos efluentes gera cerca 49.020,00m<sup>3</sup>/ano de biogás, com uma taxa de 0,214m<sup>3</sup>/KgDQO. Portanto, pôde-se verificar que o efluente de uma fábrica de chocolate possui altas taxas de matéria orgânica e, com um de fluxo ascendente de manta de lodo, pode-se atingir uma boa eficiência de remoção de DQO, obtendo quantidades suficientes de biogás que podem ser utilizadas na própria indústria de modo a economizar em custos com energia. Em um contexto sustentável, o aproveitamento energético do biogás, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, é uma fonte alternativa de energia, colaborando com a redução ou a substituição de combustíveis fósseis.

**Palavras chave:** Chocolate. Tratamento anaeróbico. Biogás.

## **Abstract**

The main purpose of this article was to estimate the biogas production through the anaerobic digestion in the residuary treatment unit of a chocolate factory. To do so, the variability of the main sample data of the process was evaluated, in a way to use them in the estimated calculations of biogas production, according to the method established by the Convention – United Nations Framework on Climate Change. The process sample data indicated that the effluents from this factory presented an emission rate of 1,90 Kg OCD/t of chocolate, an average of oxygen chemical demand (OCD) of 3.054,1 mg/L and 83% of removal efficiency. From these results, it was verified that the anaerobic treatment of effluents produces about 49.020 m<sup>3</sup>/year of biogas, with a rate of 0,214m<sup>3</sup>/Kg OCD. Therefore, it was verified that the effluent of a chocolate factory has high rates of organic matter and, with a UASB reactor, it can reach a good removal efficiency of OCD, obtaining enough amount of biogas that can be used in the factory in a way to save energy costs. In a sustainable context, the energetic use of biogas, besides contributing for the environment preservation, is an energy alternative source, collaborating with the reduction or replacement of fossil fuel.

**Keywords:** Chocolate. Anaerobic Treatment. Biogas.

### 5.1.1 Introdução

A preocupação com atitudes sustentáveis vem se fortalecendo com o surgimento de iniciativas do setor público e privado, que desenvolvem políticas preocupadas com os impactos ambientais, sociais e econômicos. Desta forma, a sustentabilidade destaca-se perante a comunidade empresarial com a Responsabilidade Social Corporativa (RSC), revelando-se pelo surgimento de indicadores e relatórios de sustentabilidade, marketing verde, entre outras iniciativas (SHARMAA e IYERB, 2012). Fato já previsto por Elkington em 1994, que, com a *Triple Bottom Line* (TBL), propõe que o desempenho das empresas deveria ser avaliado pela integração dos pilares da sustentabilidade: social, ambiental e econômico, fortalecendo além de tudo, sua imagem perante o mercado e a sociedade (ZORIĆ e HROVATIN, 2012; REIS JUNIOR, 2012).

As indústrias de chocolate não se diferem das outras indústrias nas questões de sustentabilidade, visto que durante o processo de produção são gerados efluentes líquidos poluentes, com uma carga orgânica estimada em 7,12KgDBO por tonelada de produto (CETESB, 2006). Ressalta-se que pode haver um aumento significativo nas emissões de efluentes líquidos neste setor, uma vez que a produção de chocolate no Brasil vem crescendo significativamente. De 2008 a 2013 a produção de chocolate no Brasil cresceu cerca de 36%, atingindo 800 mil toneladas neste último ano (ABICAB, 2014). Assim, os impactos gerados a partir desse aumento na produção fazem com que as empresas busquem a implantação de tecnologias e sigam procedimentos capazes de atender aos requisitos legais e/ou aos requisitos de normas como ABNT NBR ISO 14001, que têm como objetivo criar o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e ambiental, (JOUNG, *et al.*, 2013).

As emissões geradas durante a limpeza das máquinas e equipamentos influenciam na composição desses efluentes, e podem conter grandes concentrações de carboidratos e lipídios. O chocolate é composto basicamente a partir da mistura de líquor ou massa de cacau, manteiga de cacau, açúcar (sacarose), leite, derivados lácteos, emulsificantes e aromatizantes, entre outros, contendo em sua composição 65% de carboidratos e 27% de lipídios (RICHTER e LANNES, 2007; SUZUKI, 2009). De acordo com Ersahin, *et al.* (2011), essas indústrias confeitarias geram grandes

quantidades de águas residuárias, que contêm altas concentrações de matéria orgânica facilmente biodegradável, com o teor de DQO variando de 2.500 a 5.400 mg/L e DBO de 1.840 a 4.910 mg/L. O efluente da indústria de fabricação do chocolate pode ser caracterizado como não tóxico, mas com alto teor de sólidos totais (ST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). Amostras coletadas de efluentes de uma indústria de chocolate localizada na Índia apresentaram os seguintes valores: SST (2.344 mg/L); DBO (640 mg/L); DQO (1.459 mg/L) e pH de 5,79 (PARTIL, *et al.*, 2009).

As tecnologias para tratamento desses efluentes vêm se aprimorando significativamente nas últimas décadas, em especial nas indústrias que contemplam em suas águas residuárias altas concentrações de matéria orgânica (ERSAHIN *et al.*, 2011). Dentre as alternativas para buscar ações sustentáveis, o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é amplamente utilizado para o tratamento anaeróbico desses efluentes, processo importante para a produção de energia e de redução de gases de efeito estufa (GEE) (EL-GOHARY e NASR, 1999; METCALF & EDDY, 2003; CHERNICHARO, 1997).

Esses reatores são aplicados ao tratamento de esgoto doméstico e industrial e encontram-se consolidados em alguns países de clima quente, como Brasil, Colômbia e Índia, com diversos sistemas de tratamento operando em escala plena por mais de 10 anos. No Brasil, praticamente todas as análises de alternativas de tratamento incluem os reatores UASB como uma das principais opções (LOBATO, 2011).

Estudos realizados por El-Gohary e Nasr (1999) apresentaram resultados favoráveis à utilização de reatores do tipo UASB no tratamento de águas residuárias no ramo de indústrias confeitarias. Os estudos demonstram que o sistema UASB com um TDH de 12 horas e carga orgânica de 4,4 kg DBO/m<sup>3</sup>.dia alcança uma eficiência de remoção de DQO e DBO de 92,4% e 91,5%, respectivamente. Essa boa eficiência também foi confirmada por Ersahin et Al. (2008), que avaliaram o desempenho do tratamento de uma das principais indústrias confeitarias da Turquia. Os estudos contemplaram um reator do tipo EGSB (*expanded granular sludge bed*) com volume de 1.200 m<sup>3</sup>, vazão de efluente de 250 m<sup>3</sup>/dia e DQO de 3.965 Kg/dia. Nessas

condições, foram obtidos 91% de eficiência de remoção de DQO, gerando uma produção de biogás de  $1850 \pm 640$  m<sup>3</sup>/ dia.

O biogás gerado nesses reatores é geralmente constituído por alto teor metano (CH<sub>4</sub>) (70 a 80 %), e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), em menor concentração. O metano pode chegar à taxa de aproximadamente 0,3 m<sup>3</sup> de metano por kg de DQO removida. (VANHAANDEL, 1987; PAUSS, *et al.*, 1987). O biogás assume um papel importante como fonte alternativa de energia no mundo. Vários estudos foram realizados, buscando o desenvolvimento de tecnologias para intensificar a produção e, principalmente, constatar sua capacidade energética em suas diversas origens e aplicações (BEAL e RAMAN, 2000; MAKAREVICIENE, 2013; JENSEN e GOVINDAN, 2014).

Vários métodos foram desenvolvidos para estimar o potencial de produção de biogás gerado na digestão anaeróbica. Esses métodos são elaborados em função da origem do tratamento e suas características, abrangendo unidades de tratamento de esgotos domésticos e industriais, resíduos sólidos e aterros sanitários (CHERNICHARO, 2007; IPCC, 2006; SHOW e LEE, 2008; CENBIO, 2008; GERVASONI e CANTÃO, 2011; UNFCCC, 2012). Houve grande avanço nestas pesquisas surgindo modelos computacionais capazes de realizar o inventário completo das emissões de metano, além de estimar o potencial energético e seus custos (CETESB, 2006).

Buscando trazer alternativas sustentáveis, este artigo avalia o potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento anaeróbico de efluentes de uma fábrica de chocolate. De acordo com Costa (2006) a busca por incentivos ao uso de fontes alternativas de energia poderá equilibrar e até compensar os custos envolvidos com a implementação de projetos que visem à eficiência energética.

## 5.1.2 Materiais e Métodos

### 5.1.2.1 Coleta e Tratamento dos Dados

A pesquisa foi realizada em uma empresa de fabricação de chocolate, localizada no estado do Espírito Santo, a qual utiliza um reator UASB para tratar todos os seus efluentes industriais e sanitários. Os dados necessários para a pesquisa foram fornecidos pela empresa em estudo, considerando os resultados das análises físico-químicas e outros parâmetros de monitoramento para o período de janeiro de 2011 a dezembro de 2013. Todos os parâmetros são analisados e monitorados para garantir a eficiência do tratamento e, conseqüentemente, garantir os níveis legais de emissão dos efluentes. Os dados são registrados e arquivados em planilhas eletrônicas, com facilidade de acesso e estratificação para a pesquisa. Os principais parâmetros utilizados neste estudo foram: demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e vazão do efluente.

As análises físico-químicas foram realizadas por técnicos da própria empresa. Os métodos utilizados para realizar essas análises são descritos em documentos internos, detalhando os parâmetros, a frequência de amostragem, pontos de coleta, procedimentos e responsabilidades. Estes documentos foram baseados nas normas da *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado com o auxílio do *Software Minitab 16.0*, visando verificar a variabilidade das emissões de DQO, da eficiência da remoção da carga orgânica e da vazão do efluente. Para isso, foi aplicado um teste de normalidade de Anderson Darling, o qual aceita a normalidade dos dados quando p-valor for maior que 0,05. O objetivo de aplicar esse teste é identificar se a média da amostra coletada representa a população, verificando a variabilidade dos parâmetros analisados, ou seja, verificar se os dados seguem um padrão normal de variação. Desta forma, espera-se que a média esteja contida em um intervalo de confiança, com uma probabilidade de 95%. Em outras palavras, significa dizer que 95% das vezes a média da população estará dentro deste intervalo de confiança (SAMOHYL, 2009). Essas informações foram importantes para identificar a constância de emissões de

DQO, a vazão e a eficiência, e, conseqüentemente, verificar se a produção de biogás é uniforme e constante.

Também foi verificado a correlação entre a produção de chocolate com a vazão do efluente e com as emissões de DQO, usando para isso, o *Software Minitab 16.0*. A correlação, também chamada de coeficiente de correlação, indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias, ou seja se refere a medida da relação entre elas. O coeficiente de correlação de Pearson é obtido dividindo a covariância de duas variáveis pelo produto de seus desvios padrão. A análise correlacional indica a relação entre duas variáveis lineares e os valores sempre serão entre +1 e -1. O sinal indica a direção, se a correlação é positiva ou negativa, e o tamanho da variável indica a força da correlação: Se  $\rho > 0.70$  para mais ou para menos indica uma forte correlação; Se  $\rho = 0.30$  a  $0.7$  positivo ou negativo indica correlação moderada; e Se  $\rho = 0$  a  $0.30$  indica fraca correlação (SAMOHYL, 2009).

#### 5.1.2.2 Método para Estimativa da Produção do Biogás

Para a realização dos cálculos de estimativa de produção de biogás, foram considerados os resultados das análises de DQO, eficiência de remoção de carga orgânica e de vazão do efluente, após a análise estatística. O método utilizado para a estimativa da produção de metano foi estabelecido pela Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, 2012), especificamente o AMS III.H. A equação original contempla o fator de conversão do metano (GWP) em  $\text{CO}_2$ , considerando que cada tonelada de  $\text{CH}_4$  emitido tenha equivalência a 21 toneladas de  $\text{CO}_2$ . Desta forma, para estimar somente a produção de metano ( $\text{tCH}_4/\text{ano}$ ), desconsidera-se esse fator, conforme apresentado na equação 1. (SHOW e LEE, 2008; GERVASONI e CANTÃO, 2011; UNFCCC, 2012).

$$P_{\text{CH}_4} = Q \times S_0 \times \eta_{\text{rem}} \times FP_{\text{CH}_4} \times FCM \times FCI \quad (1)$$

Onde:

$P_{\text{CH}_4}$  = produção de metano de uma ETE, em t/ano;

$Q$  = volume de águas residuárias tratadas, em  $m^3$ /ano;

$S_0$  = concentração de demanda química de oxigênio total (DQO) das águas residuárias, em  $t/m^3$ ;

$\eta_{rem}$  = eficiência de remoção da DQO das águas residuárias;

$FP_{CH_4}$  = fator de produção do metano, igual a  $0,25 t CH_4/t DQO$  (IPCC, 2006);

$FCM$  = fator de correção do metano em função do tipo de tratamento;

$FCI$  = fator de correção devido as incertezas, igual a  $0,89$  (UNFCCC, 2012).

Os valores do fator de produção de metano ( $FP_{CH_4}$ ) e do fator de correção devido às incertezas ( $FCI$ ) são obtidos no guia para inventários de gases de efeito estufa do IPCC (Painel Intergovernamental para Mudança Climática) (IPCC, 2006).

De acordo com o IPCC (2006), a capacidade máxima de produção teórica de  $CH_4$  em termos de DQO removida é de  $0,25 t CH_4/t DQO$ . A abordagem teórica para o fator de produção de metano ( $FP_{CH_4}$ ) pressupõe que toda fração orgânica removida anaerobicamente é convertida em  $CH_4$ , sendo baseada na reação global estequiométrica para metanogênese em que os principais reagentes são a fração orgânica e a água, e os principais produtos incluem o  $CH_4$  e o  $CO_2$  (EL-FADEL e MASSOUD, 2001). Já o fator de correção ( $FCM$ ) varia de 0 a 1, de acordo com a via de tratamento e/ou destinação final. Para reatores UASB sem recuperação do  $CH_4$ , este valor é igual a  $0,8$  (IPCC, 2006).

Para calcular a eficiência do sistema de tratamento, foi considerada a remoção da carga orgânica, especificamente a DQO, conforme a equação 2 (CETESB, 2006).

$$\eta_{rem} (\%) = \frac{DQO_{Afluente} - DQO_{Efluente}}{DQO_{Afluente}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$\eta_{rem}$  = eficiência de remoção da DQO das águas residuárias (%);

$DQO_{Afluente}$  = DQO do afluente (mg/L);

$DQO_{Efluente}$  = DQO do efluente (mg/L);

A produção total de biogás foi calculada a partir da produção e da concentração esperada de metano ( $CH_4$ ), de acordo com a Equação 3. Para efeito de cálculo, será considerada para esse estudo uma concentração de 70% de metano, já que o biogás de reatores UASB é geralmente constituído por metano com alto teor (70 a 80 %) (PAUSS, *et al.*, 1987).

$$P_{Biogás} = \frac{P_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad 3$$

Onde,

$P_{Biogás}$ : Produção de biogás (t/ano);

$P_{CH_4}$ : Produção de metano de uma ETE (t/ano);

$C_{CH_4}$ : Concentração de metano (%).

### 5.1.3 Resultados e Discussão

#### 5.1.3.1 Avaliação da Eficiência de Remoção da Carga Orgânica

Neste item, verificou-se a eficiência de remoção da carga orgânica no reator UASB e a variabilidade da vazão e das emissões de DQO dos efluentes no período de 2011 a 2013. Na tabela 14, são apresentados os dados coletados com a média mensal de cada parâmetro do afluente e do efluente do reator em estudo.

Tabela 14 - Dados obtidos do reator UASB da indústria de chocolate para o período de 2011 a 2013

Períodos	Afluente		Efluente		Vazão Média (m³/dia)
	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	
<b>Ano – 2011</b>					
JAN	3624,6	2077,9	413,0	320,8	207,1
FEV	3866,5	2090,0	380,0	369,4	233,3
MAR	3780,0	*	378,0	*	182,2
ABR	3698,0	*	389,0	*	201,5
MAI	3605,0	2180,0	397,3	265,3	204,0
JUN	2352,5	1526,9	441,2	184,0	199,6
JUL	2545,0	1469,3	601,0	144,1	196,3
AGO	3109,5	1391,3	496,8	221,7	201,3
SET	3010,0	1847,2	674,0	262,5	205,2
OUT	2221,0	993,1	540,0	232,5	210,2
NOV	2097,1	816,5	238,0	141,8	220,6
DEZ	2547,5	1420,1	240,7	256,8	232,2
<b>Ano – 2012</b>					
JAN	3058,0	1819,4	662,6	250,3	241,2
FEV	3291,9	1706,8	571,0	272,9	240,0
MAR	1908,2	1079,3	670,6	278,0	195,8
ABR	3948,7	2006,3	676,0	296,3	173,1
MAI	3209,4	1691,4	679,6	203,3	158,3
JUN	3100,0	1878,5	655,0	312,8	191,6
JUL	3615,0	2117,7	3512,0	298,2	198,3
AGO	4050,7	*	3362,8	*	194,3
SET	2955,3	*	2124,0	*	187,2
OUT	2835,0	*	2089,7	*	191,9
NOV	2801,2	*	2079,8	*	177,0
DEZ	2801,2	*	2079,8	*	178,0
<b>Ano – 2013</b>					
JAN	4075,6	*	3884,0	*	185,6
FEV	4479,9	*	3680,8	*	173,0
MAR	4381,6	*	3697,0	*	128,1
ABR	4170,7	*	3590,4	*	134,9
MAI	5485,2	*	4384,0	*	134,4
JUN	4124,0	*	3716,5	*	145,0
JUL	4548,0	*	4168,5	*	146,7
AGO	3954,2	*	2515,0	*	164,9
SET	3252,7	*	1348,3	*	151,2
OUT	2700,0	398,5	1381,0	*	139,4
NOV	1427,5	1055,0	831,2	*	126,0
DEZ	2813,9	*	953,0	*	131,9

(\*) análises não realizadas

Na Figura 12, observa-se que a vazão do efluente do reator, sofreu variações acentuadas, as quais são influenciadas pelo volume de produção de chocolate, ou por possíveis melhorias realizadas nesse processo; fato confirmado pela redução da produção de chocolate em 15% entre 2012 e 2013. Foi observado que existe uma correlação entre a produção de chocolate e a vazão, porém moderada ( $\rho = 0,61$ ). De acordo com Samohyl (2009), uma correlação moderada tem um coeficiente ( $\rho$ ) entre 0.30 e 0.7 (positivo ou negativo) e indica que podem existir outros fatores de influência, como as emissões dos efluentes sanitários.

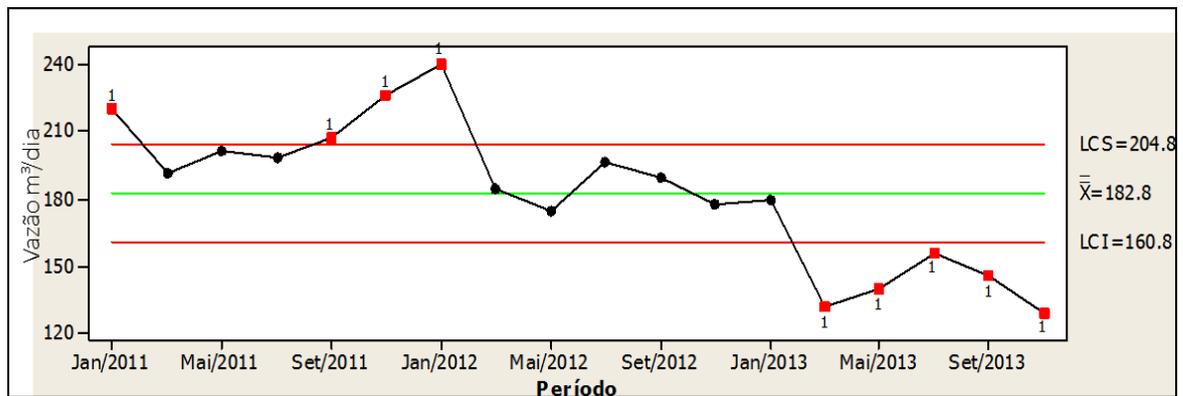


Figura 12 - Valores de vazão do efluente para os anos 2011 à 2013.

Para verificar a variabilidade da vazão do efluente do reator foi realizado um teste de normalidade nos dados, conforme apresentado na figura 13. Os resultados demonstram que as emissões seguem uma normalidade, com p-valor de 0,178 e que existe uma chance de 95% da real vazão do efluente estar dentro do intervalo de confiança entre 171,74 e 193,89 m<sup>3</sup>/dia.

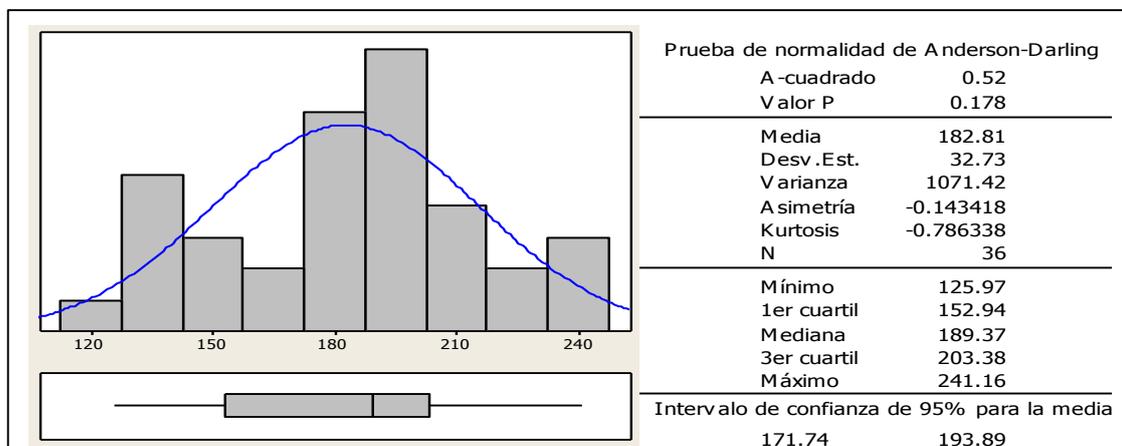


Figura 13 - Teste de normalidade para a vazão do efluente para o período de 2011 a 2013

Os resultados das análises da DQO do afluente para o mesmo período apresentaram uma média de 3.318 mg/L e desvio padrão de 846,6 mg/L. As variações observadas na figura 14 podem ser relacionadas ao acréscimo ou decréscimo da produção de chocolate na fábrica. Porém, não foi encontrada uma correlação direta entre essas variáveis (DQO e Produção), pois existem fatores no processo que podem influenciar nessa relação, como o planejamento da produção, os procedimentos de limpeza dos equipamentos, entre outros. Por exemplo, se houver maior frequência de limpeza nos equipamentos, poderá ocorrer um aumento significativo da carga orgânica nos efluentes.

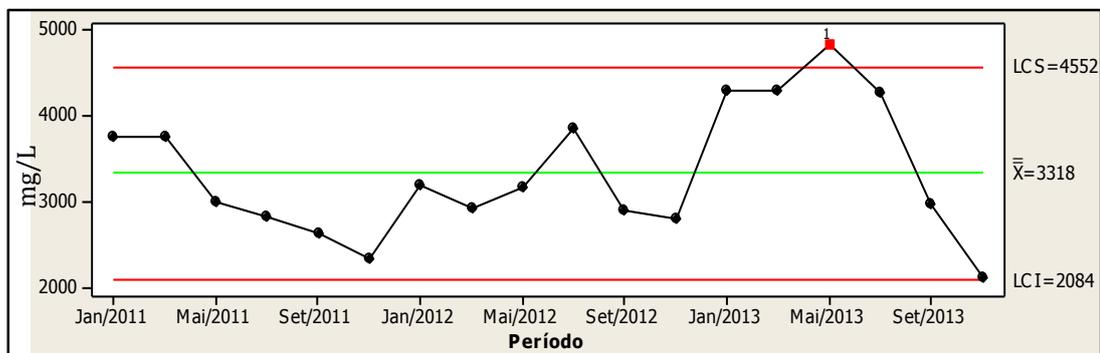


Figura 14 - Valores da DQO do afluente do reator para os anos 2011 à 2013.

Para verificar a constância de emissões de DQO do afluente do reator, foi realizado um teste de normalidade nos dados, conforme apresentado na Figura 15. Os resultados demonstram que as emissões seguem uma normalidade, com p-valor de 0,903, e que existe uma probabilidade de 95% dos reais valores analisados da DQO estarem dentro do intervalo de confiança entre 3.301,4 e 3.604,4 mg/L.

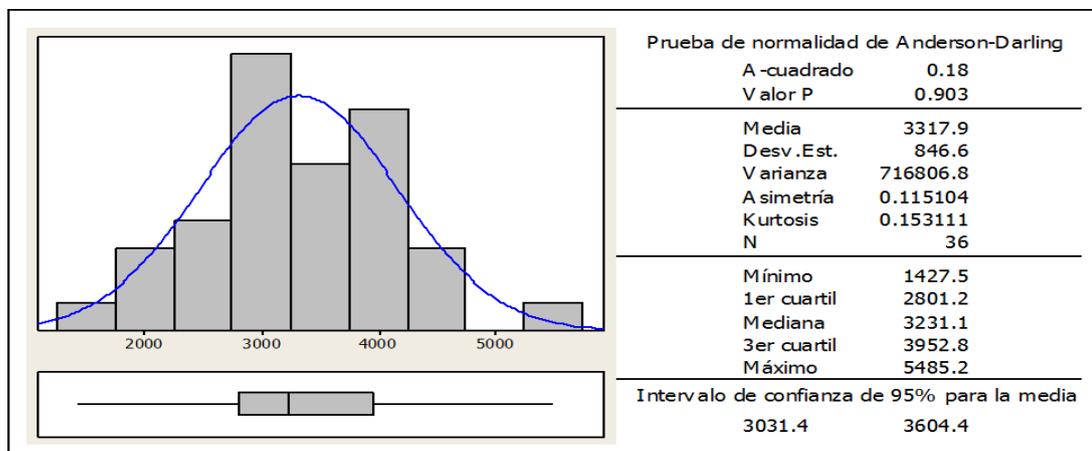


Figura 15 - Teste de normalidade das análises de DQO para o período de 2011 a 2013

Em função das análises da DQO do afluente e do efluente, é possível calcular a eficiência de remoção da carga orgânica do reator para o período analisado. Na Figura 16, verifica-se que a partir de Julho de 2012 o sistema entrou em colapso, reduzindo sua eficiência média de 83%, para 25% nos períodos posteriores. A partir de Julho de 2012 a DQO do afluente ficou com valores próximos aos da DQO do efluente do reator, demonstrando instabilidade no sistema.

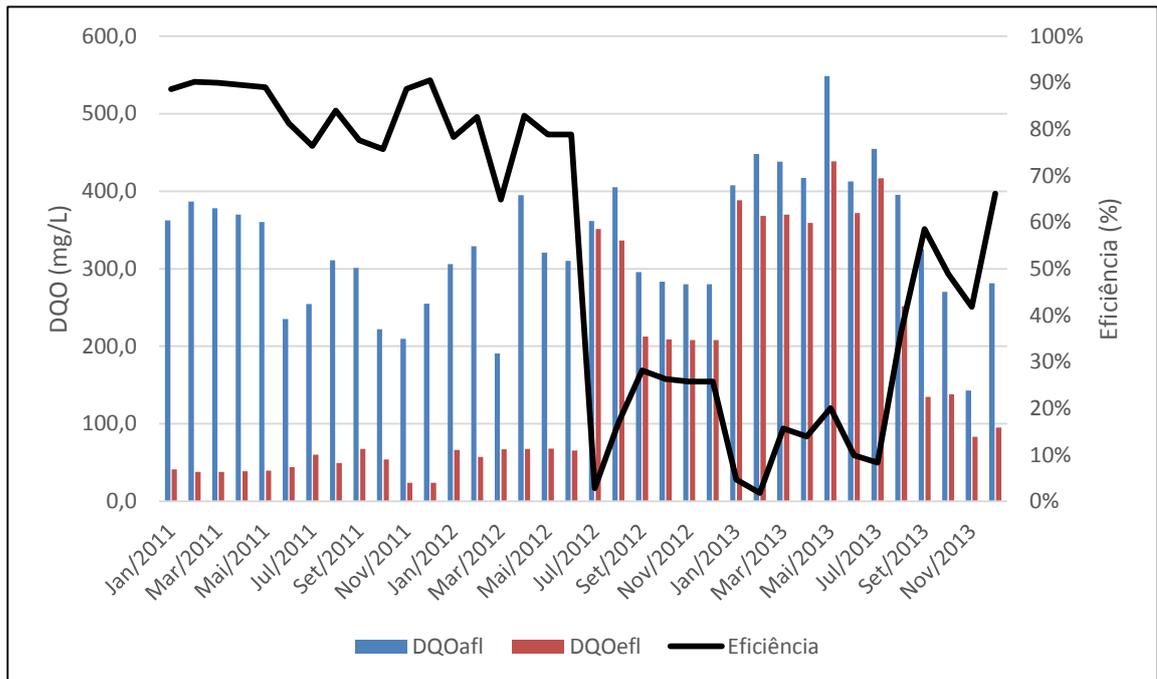


Figura 16 - Acompanhamento das emissões de DQO do afluente e efluente, e eficiência e remoção da DQO para período de 2011 a 2013

Os principais fatores que contribuíram para a queda da eficiência do reator foram as falhas elétricas e mecânicas em alguns equipamentos na unidade de tratamento, não relatados pela fábrica, mas que já foram solucionados. Nesse período os efluentes da fábrica foram tratados principalmente pelo processo aeróbico.

Em função dessa instabilidade, não foram considerados os resultados das análises realizadas nos períodos posteriores a Junho de 2012. Apenas os dados de Janeiro de 2011 a Junho de 2012 foram utilizados para os estudos de produção de biogás.

Nesse período, a vazão média do efluente foi de 205,2 m<sup>3</sup>/dia, a DQO média do afluente do reator foi de 3.054,1mg/L. Os dados das emissões de DQO seguem uma normalidade, com p-valor de 0,201, e existe uma probabilidade de 95% da média de

DQO estar dentro do intervalo de confiança entre 2.733,8 a 3.374,3 mg/L, conforme apresentado na figura 17.

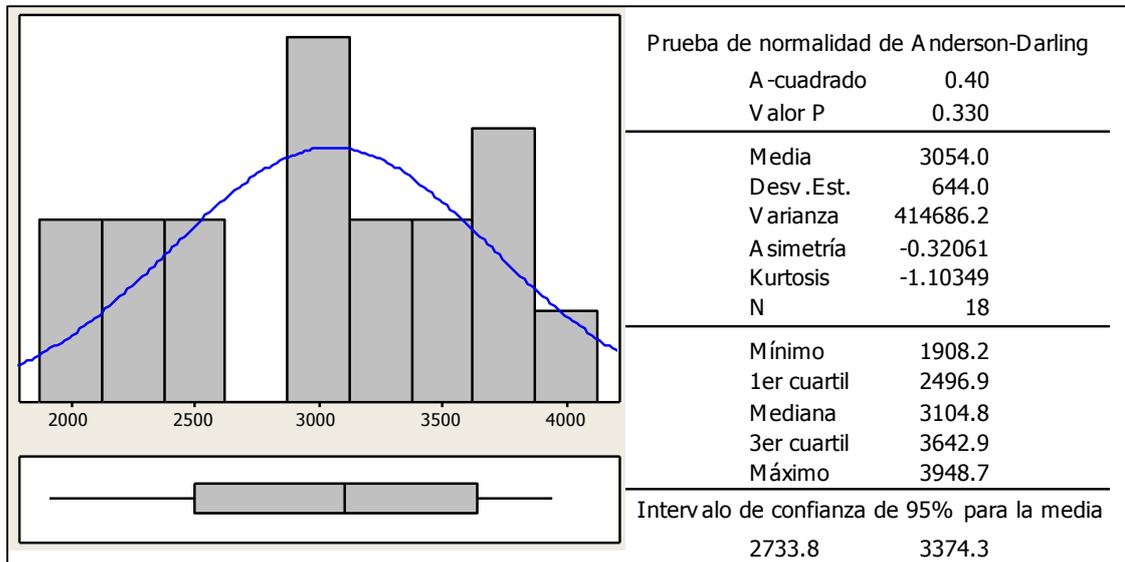


Figura 17 - Teste de Normalidade para as emissões de DQO para o período de jan/2011 a jun/2012

A eficiência de remoção da carga orgânica segue uma normalidade, com p-valor de 0,095, indicando que existe uma probabilidade de 95% da média da eficiência estar dentro do intervalo de confiança entre 79% a 86%. Observa-se na Figura 18 que os resultados mensais das eficiências de remoção se concentram acima de 75% e a eficiência média de remoção da carga orgânica encontra-se em 83%.

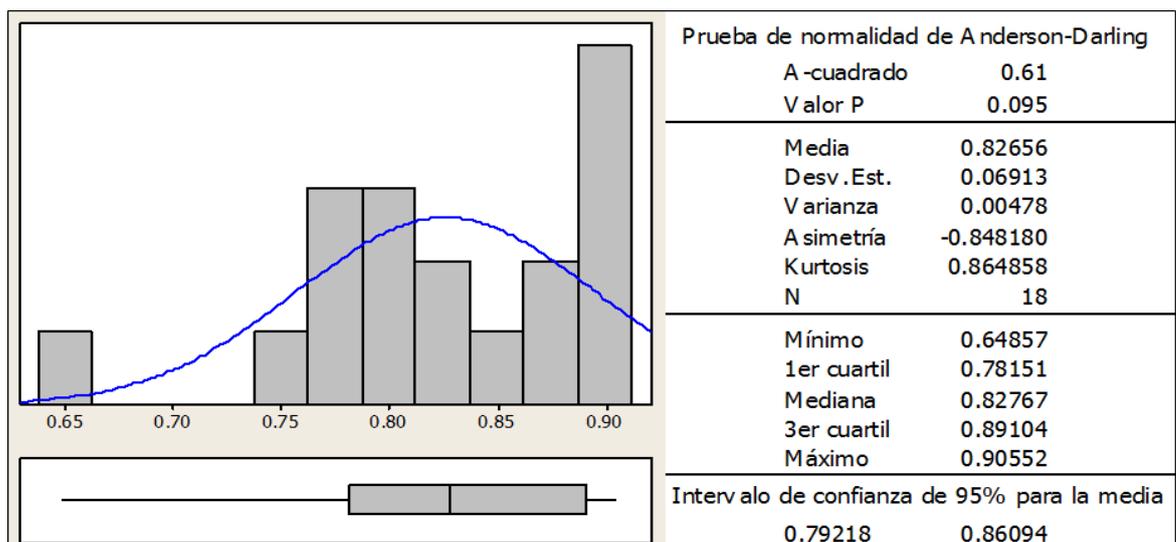


Figura 18 - Teste de Normalidade para a eficiência de remoção da DQO para o período de jan/2011 a jun/2012

As principais características do efluente da fábrica de chocolate em estudo podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 - Características do efluente da fábrica de chocolate em estudo - Jan/2011 a Jun/2012

Parâmetros	Unidade	Valores	
		Média	Desvio Padrão
Vazão	(m <sup>3</sup> /dia)	205,2	22,32
DQO afluente	(mg/L)	3.054,1	643,96
DQO efluente	(mg/L)	505,8	151,15
Eficiência em remoção de DQO	%	83	6%
DBO afluente	(mg/L)	1.624,6	409,80
DBO efluente	(mg/L)	250,8	61,1
Produção de Chocolate	(t/mês)	9.869,4	1.622,5
Fator de emissão (DBO/t Chocolate)	KgDBO/t	1,01	-
Fator de emissão (DQO/t Chocolate)	KgDQO/t	1,90	-

De acordo Dezotti (2008), a relação de DQO/DBO entre valores na faixa de 1,5 a 2,5 sugerem que os poluentes presentes no efluente sejam na maioria biodegradáveis. Dessa forma, observa-se que a relação DQO/DBO encontrada é de 1,9 demonstrando que a matéria orgânica dessas águas residuárias é biodegradável.

Apesar da literatura apresentar um fator de emissão de 7,12 KgDBO/t de produtos em fábricas de chocolate e doces diversos (CETESB, 2006), os resultados da pesquisa mostram um fator de 1,01 KgDBO/t.

Neste estudo, os resultados indicaram que as águas residuárias apresentam níveis constantes de emissões de DQO de 3.054,1mg/L e desvio padrão de 644mg/L. Esses afluentes foram tratados anaerobicamente em um reator UASB atingindo 83% de remoção de carga orgânica em condições normais de operacionalidade. De acordo com Ersharin, *et al.* (2011), as emissões de DQO com concentrações maiores que 2.300 mg/L aumentam a possibilidade de produção de biogás gerado no tratamento anaeróbico, em quantidade suficiente para aproveitamento em energia.

### 5.1.3.2 Cálculo da Produção de Biogás

Neste item, foi calculada a produção de biogás para o período de janeiro de 2011 a junho de 2012. Na Tabela 16, são apresentados os valores da DQO do afluente e efluente, da vazão e da eficiência de remoção utilizados para a estimativa da produção do biogás.

Tabela 16 - Dados para cálculo da produção de biogás – Jan/2011 a Jun/2012

Períodos	Dados do Afluente		Dados do Efluente		Vazão Média (m <sup>3</sup> /dia)	Eficiência
	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)		
Jan/2011	3624,6	2077,9	413,0	320,8	207,1	89%
Fev/2011	3866,5	2090,0	380,0	369,4	233,3	90%
Mar/2011	3780,0	*	378,0	*	182,2	90%
Abr/2011	3698,0	*	389,0	*	201,5	89%
Mai/2011	3605,0	2180,0	397,3	265,3	204,0	89%
Jun/2011	2352,5	1526,9	441,2	184,0	199,6	81%
Jul/2011	2545,0	1469,3	601,0	144,1	196,3	76%
Ago/2011	3109,5	1391,3	496,8	221,7	201,3	84%
Set/2011	3010,0	1847,2	674,0	262,5	205,2	78%
Out/2011	2221,0	993,1	540,0	232,5	210,2	76%
Nov/2011	2097,1	816,5	238,0	141,8	220,6	89%
Dez/2011	2547,5	1420,1	240,7	256,8	232,2	91%
Jan/2012	3058,0	1819,4	662,6	250,3	241,2	78%
Fev/2012	3291,9	1706,8	571,0	272,9	240,0	83%
Mar/2012	1908,2	1079,3	670,6	278,0	195,8	65%
Abr/2012	3948,7	2006,3	676,0	296,3	173,1	83%
Mai/2012	3209,4	1691,4	679,6	203,3	158,3	79%
Jun/2012	3100,0	1878,5	655,0	312,8	191,6	79%
<b>Média</b>	3054,1	1624,6	505,8	250,8	205,2	83%
<b>Desvio padrão</b>	644,0	409,8	151,1	62,0	22,3	7%

(\*) Amostragem não realizada no mês

A fábrica de chocolate em estudo gera grande volume de águas residuárias no processo, atingindo uma vazão média de 205,2 m<sup>3</sup>/dia. O tratamento anaeróbico reduz a DQO de 3.054,1 mg/l para 505,8 mg/l em média, com uma eficiência de remoção de 83%, conforme apresentado na Tabela 17.

O memorial de cálculos utilizado para estimar a produção de metano e biogás, apresentado na Tabela 17, baseia-se na remoção e na eficiência da DQO, na vazão, e em outros parâmetros sugeridos pela literatura e pelo método do UNFCCC.

Tabela 17 - Memorial de cálculos para estimativa de produção de metano e biogás

DESCRIÇÃO	EQUAÇÕES	RESULTADOS
Carga de DQO no afluente (Kg/m <sup>3</sup> )	DQO	3,05
Vazão média do efluente (m <sup>3</sup> /dia)	Vazão	205,20
DQO <sub>TOTAL</sub> (Kg/ano)	$DQO_{TOTAL} = DQO \times Vazão \times \frac{365 \text{ dias/ano}}{365 \text{ dias/ano}}$	228.746,00
Eficiência de remoção da DQO	$\eta_{rem}$	83 %
Fator de produção de CH <sub>4</sub> (KgCH <sub>4</sub> /Kg DQO)	FP <sub>CH<sub>4</sub></sub>	0,25
Fator de correção do CH <sub>4</sub>	FCM	0,80
Fator de correção devido às incertezas	FCI	0,89
Produção de CH <sub>4</sub> (Kg/ano)	$P_{CH_4} = \frac{DQO_{Total} \times \eta_{rem} \times FP_{CH_4}}{CP_{CH_4} \times FCM \times FCI}$	33.795,00
Densidade do CH <sub>4</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade	0,65
Conversão P <sub>CH<sub>4</sub></sub> volume (m <sup>3</sup> /ano)	Volume <sub>CH<sub>4</sub></sub> = P <sub>CH<sub>4</sub></sub> / Densidade	51.992,00
Para cálculo da produção útil de metano (m <sup>3</sup> /ano), deve-se descontar as perdas envolvidas no processo. Desta forma foi considerada uma perda de 34% de metano.	$P_{LiqCH_4} = P_{CH_4} - P_{CH_4} \times 0,34$	34.314,00
Para a conversão do metano produzido em biogás, foi considerada como referência uma concentração de 70% de metano (m <sup>3</sup> /ano)	$P_{Biogás} = P_{LiqCH_4}/0,7$	49.020,00

Os resultados apresentaram uma produção média de biogás de 49.020 m<sup>3</sup>/ano e taxa de 0,214 m<sup>3</sup>biogás/KgDQO, já considerando as perdas do metano dissolvido no efluente. A taxa de emissão total de biogás para esses efluentes é caracterizada em 0,3247 m<sup>3</sup>biogás/KgDQO, conforme apresentado na Tabela 18. Segundo Astals *et al.*(2011), a produção de biogás em função da DQO pode atingir valores entre 0,275 e 0,583 m<sup>3</sup>/KgDQO.

Tabela 18 - Resultados obtidos no cálculo de produção de metano da fábrica de chocolate

Parâmetros	Unidade	Valores	
		Média	Desvio Padrão
Vazão do efluente	(m <sup>3</sup> /d)	205,2	22,3
DQO afluente	(Kg/m <sup>3</sup> )	3,05	0,60
Eficiência em remoção de DQO	%	83	7
Emissões Totais de Metano	(m <sup>3</sup> /ano)	51.992,00	-
Emissões Líquidas de Metano	(m <sup>3</sup> /ano)	34.314,00	-
Produção de Biogás (70% de CH <sub>4</sub> )	(m <sup>3</sup> /ano)	49.020,00	-
Taxa emissão de Metano (*)	(m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / KgDQO)	0,227	
Taxa de emissão Biogás (*)	(m <sup>3</sup> Biogás/ KgDQO)	0,306	-

(\*) Taxas de emissões estimadas sem considerar as perdas de metano no processo.

Na figura 19, é apresentado um esquema do potencial de produção de biogás gerado na unidade de tratamento anaeróbico da fábrica em estudo.

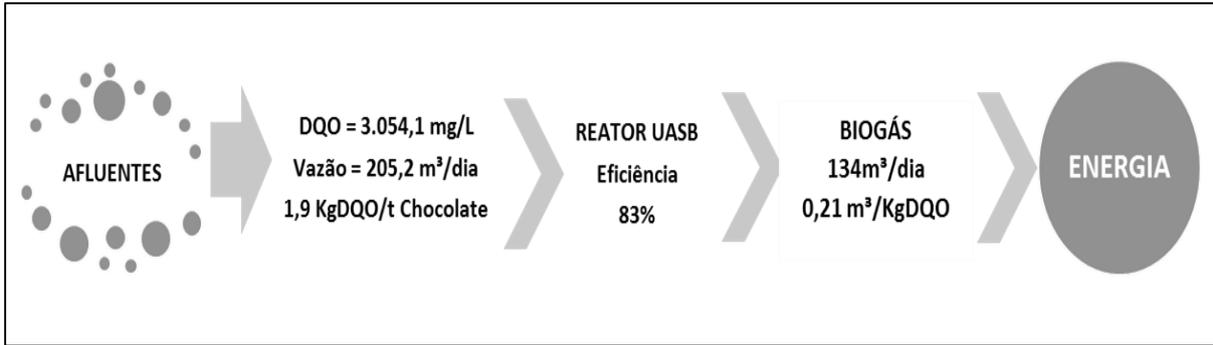


Figura 19 - Esquema do potencial de produção de biogás da fábrica de chocolate em estudo

#### 5.1.4 Conclusão

Os resultados apresentados nesta pesquisa indicaram que o efluente de uma fábrica de chocolate possui uma concentração de DQO relativamente alta e níveis constantes de emissões, com valores médios de 3.054,1 mg/L, que, quando tratados anaerobicamente, foram removidos com uma eficiência de 83%. De acordo com Ersharin, *et al.* (2011), as emissões de DQO com concentrações maiores que 2.300 mg/L aumentam a possibilidade de produção de biogás em quantidade suficiente para o aproveitamento em energia.

Em função dessas emissões e da boa eficiência de remoção da DQO, estimou-se uma produção útil de 49.020,00 m³ de biogás por ano. De acordo com Avelar (2001), (AVELLAR, 2001) 1 m³ de biogás é equivalente a 6,5 Kw/h de eletricidade, logo, é evidente o potencial de geração de energia proveniente de tratamento anaeróbico de efluentes industriais da fábrica de chocolate em estudo.

Os testes estatísticos de normalidade realizados nos dados da DQO, da vazão do efluente e da eficiência de remoção da carga orgânica apresentaram resultados com baixa variabilidade e demonstram que as médias futuras desses dados têm 95% de probabilidade de estarem em um intervalo de confiança, já calculado neste estudo. Sendo essas variáveis fundamentais para realização dos cálculos para a estimativa da produção do biogás, conclui-se que a geração desse gás pode ocorrer de forma contínua.

Sendo assim, este artigo pode ser utilizado como referência para a caracterização dos efluentes e para a estimativa da produção de biogás, abrindo oportunidades para novos estudos que visem à captação e ao aproveitamento do biogás produzido em unidades de tratamento anaeróbico, de forma a contribuir para o aumento da eficiência energética, para melhorias ambientais e sociais, proporcionando um desenvolvimento de forma sustentável.

### 5.1.5 Referências

ABICAB. Associação Brasileira da Indústria de Chocolates, Cacau, Amendoim, Balas e Derivados. **ABICAB**, 2014. Disponível em: <<http://www.abicab.org.br/institucional/historia-abicab/>> . Acesso em: 23 Março 2014.

ASTALS, S. *et al.* Codigestion of Pig Manure and Glycerine: Experimental and Modelling Study. **Journal of Environmental Management**. v. 92, p. 1091-1096, 2011.

BEAL, L. J.; RAMAN, D. R. Sequential Two-Stage Anaerobic Treatment of Confectionery Wastewater. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 76, 211-217, 2000.

CETESB. **Manual do usuário do programa computacional do Biogás: Geração e Uso Energético - Efluentes e Resíduos Rurais - Versão 1.0.** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006.

CHERNICHARO, C. A. D. L. **Princípios de Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, v. 5, 2007. 380 p.

COSTA, D. F. D. **Geração de Energia Elétrica d Partir Do Biogás do Tratamento de Esgoto**, 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DEZOTTI, M. **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-Papers serviços editoriais LTDA, v. 5, 2008. 360 p.

EL-FADEL, M.; MASSOUD, M. Methane emissions from wastewater management. **Environmental Pollution**, v. 114, 177-185, 2001.

EL-GOHARY, F. A.; NASR, F. A. & A. H. I. Cost-Effective Pre-treatment of Food Processing Industrial Wastewater. **Water Science and Technology**, v. 40, 17-24, 1999.

ERSAHIN, M. E. *et al.* Anaerobic Treatment of Industrial Effluents: An Overview of Application. In: GARCÍA, F. S. **Waste Water - Treatment and Reutilization**. Istanbul: InTech, p. 434, 2011.

GERVASONI, R.; CANTÃO, M. P. Produção de metano a partir da digestão anaeróbia: relação entre teoria e prática. **Espaço Energia: Revista técnico-científica da área de energia**, Paraná, v. 15, 15, Outubro, 2011.

IPCC. WASTEWATER TREATMENT AND DISCHARGE. In: IPCC **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. v. 5, 2006. Cap. 6.

JENSEN, J. K.; GOVINDAN, K. Assessment of renewable bioenergy application: a case in the food supply chain industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, 254–263, 2014.

JOUNG, C. B. *et al.* Categorization of indicators for sustainable manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 24, 148-157, 2013.

LOBATO, L. C. D. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores uasb tratando esgoto doméstico**, 2011. 186 f. Tese (Doutorado em Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MAKAREVICIENE, V. *et al.* Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation. **Energy Conversion and Management**, v. 75, 224-233, 2013.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reus**. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

PATIL, S. A. *et al.* Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. **Tecnologia Bioresource**, V. 100, 5132-5139, 2009.

PAUSS, A.; NAVEAU, H.; NYNS, E. **Biogas production**. New York: Wiley-Interscience publication, 273-291 p, 1987.

REIS JUNIOR, J. A. **Análise da potencialidade do mercado de projetos de crédito de carbono no Brasil**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Controladoria e Contabilidade) - Universidade de São Paulo, SP, 2012

RICHTER, M.; LANNES, S. C. D. S. Ingredientes usados na indústria de chocolates. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, São Paulo, v. 43, Jul 2007.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico de Qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SHARMAA, A.; IYERB, G. R. Resource-constrained product development: Implications for green marketing and green supply chains. **Industrial Marketing Management**, v. 41, 599–608, 2012.

SHOW, K. Y.; LEE, D. J. Carbon credit and emission trading: Anaerobic wastewater treatment. **Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers**, v. 39, 557–562, 2008.

SUZUKI, R. M. **Composição Química e Quantificação de Ácidos Graxos em chocolates**, 2009, Tese (Doutorado em Ciência) - Programa de Pós-Graduação em Química do Departamento de Química do Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

UNFCCC. UNFCCC. **Approved Methodologies for Small Scale CDM Project Activities**. Type III, AMS III.H Methane recovery in wastewater treatment (Version 16.0), 2012. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/4ND00PCGC7WXR3LOLOJT S6SVZP4NSU>>. Acesso em: 25 Junho 2013.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1994. 222 p.

ZORIĆ, J.; HROVATIN, N. Household willingness to pay for green electricity in Slovenia. **Energy Policy**, v. 47, 180–187, 2012.

## 5.2 ARTIGO 2

---

### CENÁRIOS SUSTENTÁVEIS PARA APROVEITAMENTO DO BIOGÁS GERADO EM TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA FÁBRICA DE CHOCOLATE

#### **Resumo**

Este artigo propôs estudar dois cenários para o aproveitamento energético do biogás gerado no tratamento anaeróbico em uma fábrica de chocolate, considerando a capacidade de produção do biogás, o levantamento de custo para o investimento e a análise tempo de retorno. O primeiro cenário contemplou a geração de energia elétrica através de um sistema de motorgerador de 9,5 Kwh a biogás, que operando a 20 h/dia pode produzir cerca de 58.400,00 Kwh/ano e obter uma receita de R\$20.296,00/ano. O segundo cenário contemplou a utilização do biogás para alimentar as caldeiras para geração de vapor. O aproveitamento do biogás gerado durante o tratamento anaeróbico (49.020,00m<sup>3</sup>/ano) é equivalente 28.431 m<sup>3</sup>/ano de gás natural (GN). Considerando que o consumo real de GN nas caldeiras é de 2.756.938 m<sup>3</sup>/ano, pode-se afirmar que o aproveitamento de biogás representaria uma economia em 1,02 % de GN. Ganho significativo quando relacionado aos gastos anuais em GN, que chegam a R\$ 3.287.097; logo, em termos financeiros a empresa teria uma economia de aproximadamente de R\$32.540,00 por ano. Os investimentos necessários foram de R\$ 107.000,00, sendo recuperados em 4 anos e 3 meses. Comparando os dois cenários, verifica-se que, apesar dos investimentos para geração de eletricidade serem menores, o cenário para utilização de biogás nas caldeiras traz maior retorno financeiro com economia de gás natural. Desta forma este artigo recomenda o aproveitamento do biogás para queima nas caldeiras da fábrica, visto que os resultados apresentados demonstram a viabilidade e a disponibilidade de tecnologia no mercado.

**Palavras chave:** Biogás. Energia elétrica. Caldeiras a vapor. Sustentabilidade.

## **Abstract**

This article proposed to study two scenarios for the biogas energetic use generated in the anaerobic treatment in a chocolate factory, considering the production capacity of biogas, the cost survey for the investment and the return time analysis. The first scenario contemplated the electric energy production through a motor-generator system of 10 Kwh by biogas, that when operating at 20 h/day can produce about 58.400,00 Kwh/year and obtain an income of R\$ 20.296,00/year. The second one contemplated the use of biogas to feed the boilers to generate steam. The use of biogas produced during the anaerobic treatment (49.020,00 m<sup>3</sup>/year) is equivalent to 28.431 m<sup>3</sup>/year of natural gas (NG). Considering that the actual consumption of NG in the boilers is 2.756.938 m<sup>3</sup>/year, we can affirm that the biogas use would represent a savings in 1,02 % of NG. Significant gain when related to the annual expenses of NG that reach R\$ 3.287.097; ergo, in financial terms the Company would save approximately R\$ 32.540 per year. The necessary investments were R\$ 107.000,00, and recovered in 4 years and 3 months. When comparing both scenarios, it is verified that, despite the investments used for producing electricity being smaller, the scenario to use biogas in the boilers brings a greater financial return with the savings of natural gas. This way, this article recommends the use of biogas for the burn in the factory's boilers, since the presented results indicate the viability and availability of technology in the market.

**Keywords:** Biogas. Electricity. Steam boilers. Sustainability.

### 5.2.1 Introdução

Um dos desafios contínuos enfrentados pela sociedade é a utilização das energias disponíveis, uma vez que os recursos naturais e as reservas de combustíveis fósseis estão em declínio, enquanto as populações e as preocupações com o aquecimento global vêm crescendo. Uma solução é desenvolver alternativas sustentáveis para fornecer energia de forma a contribuir para um menor impacto ao meio ambiente (CIOTOLAA *et al.*, 2011).

A busca por energias sustentáveis está entre as principais prioridades políticas em muitos países. Novas fontes de energia renováveis, como a eólica, a solar e a biomassa, têm um papel fundamental para sustentabilidade do planeta. Dentre essas alternativas, está a produção de biogás via tratamento anaeróbico, que, além de gerar recursos valiosos, promove a remoção de contaminantes ambientais (WIRTHA, *et al.*, 2013).

No tratamento anaeróbico de efluentes altamente orgânicos, ocorre a produção de biogás, um combustível renovável com uma fração significativa de metano (50-75%). O biogás pode ser usado para a geração de energia elétrica ou térmica, reduzindo assim as necessidades energéticas externas, as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis (SCHOENA e BAGLEY, 2012).

Componente importante do biogás, o metano é o único que contribui para o valor energético, devido ao seu alto poder calorífico (8.500 Kcal/Nm<sup>3</sup>) próximo ao do gás natural de petróleo (8.554 Kcal/Nm<sup>3</sup>) (AVELLAR, 2001). Surendra (2014) afirma que 1m<sup>3</sup> de biogás, em condições normais de temperatura e pressão, contendo 60% de CH<sub>4</sub>, tem um valor de aquecimento de 21,5 MJ (5,97 kWh), enquanto o CH<sub>4</sub> puro atinge 35,8 MJ (9,94 kWh) (SURENDRA, *et al.*, 2014).

No entanto, o aproveitamento energético do biogás depende fundamentalmente da sua qualidade para cumprir os requisitos das tecnologias existentes, podendo ser exigidas restrições de impurezas, ou ainda, se necessário, tratamento para a remoção a níveis aceitáveis antes da utilização, por isso o planejamento é essencial para determinar as instalações desses projetos (RASI, *et al.*, 2011).

Desde o início do ano 2000, as tecnologias referentes à produção e ao uso do biogás vêm se desenvolvendo no mundo, sendo no momento uma alternativa estratégica para os setores públicos e privados (WIRTHA, *et al.*, 2013). O biogás pode ser utilizado na produção de calor e vapor de água, na geração de energia elétrica ou cogeração, uso como combustível de veículos, entre outras. Sendo em sua maioria utilizado como combustão direta com recuperação de calor, ou geração de eletricidade por motorgeradores ou por turbinas (APPLEL *et al.*, 2008; USEPA, 2009).

A utilização do biogás como combustão direta com recuperação de calor é o método mais simples e mais eficiente de recuperar energia do biogás, uma vez que mais de 80% do valor calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil. De acordo com estudos da EPA (*Environmental Protection Agency*), esse tipo de uso de biogás respondeu por cerca de 1/3 de todos os projetos de recuperação de energia nos Estados Unidos da América em 2008 (USEPA, 2009).

Uma das formas de combustão direta é a utilização do biogás em caldeiras. No Brasil, já existem empresas especializadas em tecnologias para a utilização de biogás em caldeiras para a queima, reduzindo o custo do vapor ou a energia gerada. A tecnologia visa modificar o tipo de queimador, normalmente utilizado para a queima de gás natural (GN) ou gás liquefeito do petróleo (GLP), sem necessidade de troca do queimador original. Dessa forma, o custo de conversão do biogás para a utilização em caldeiras pode ser viável (TECCALOR, 2014).

A utilização do biogás em caldeiras proveniente do tratamento anaeróbico de uma fábrica de cerveja no Canadá foi uma alternativa viável para aumentar a eficiência energética da empresa. De acordo com Alm *et al.* (2011), a implantação do sistema de controle automático de mistura de gás natural e biogás favoreceu uma redução no consumo de GN em 9,8%. Estudos realizados por Jensen e Govindan (2014) também demonstraram que a utilização de biogás gerado no tratamento de efluentes em uma indústria panificadora pode ser viável quando queimado em caldeiras para geração de vapor, porém os investimentos dependem das políticas de incentivo e dos custos de implantação do projeto.

Das tecnologias disponíveis para geração de energia elétrica utilizando o biogás, destacam-se as turbinas a gás e os grupos de geradores de combustão interna.

Ambas têm o papel de transformar a energia química do gás em energia mecânica que impulsionará um alternador para conversão em energia elétrica (COSTA, 2006). De acordo com Dudek (2010), a viabilidade para aproveitamento de biogás em motores depende do seu volume de produção e da concentração de metano, indicando em seus estudos taxas viáveis de 30 a 2.000 m<sup>3</sup>/h com 50% de CH<sub>4</sub>. Dentre as desvantagens para a utilização do biogás, quando em condições de baixa produção, são os altos custos de armazenagem, pois é um gás leve e de baixa densidade e de difícil liquefação (SALOMON e LORA, 2005).

Porém, estudos realizados por Schoena e Bagley (2012), em uma indústria de lã, demonstraram que, mesmo em condições de baixa produção de biogás (100m<sup>3</sup>/h) gerado no tratamento anaeróbico, existem tecnologias diversas que podem reaproveitá-lo. Foram realizadas simulações de geração de energia elétrica e térmica em vários equipamentos, como caldeiras, microturbina, motor a gasolina e motor *striling*. Os resultados destacaram a utilização desse gás para a queima em caldeiras na geração de vapor, devido a sua viabilidade econômica.

Em função do potencial energético do metano, este artigo tem como objetivo estudar dois cenários para o aproveitamento do biogás gerado no tratamento anaeróbico em uma Fábrica de Chocolate, considerando as características das instalações dessa fábrica, a capacidade de produção do biogás e a análise do investimento e do tempo de retorno. Sendo assim, se os cenários analisados apresentarem resultados que demonstrem um retorno financeiro aceitável, a empresa poderá implantá-los para geração de energia.

### **5.2.2 Materiais e Métodos**

Atualmente, a indústria em estudo possui em sua planta uma unidade de tratamento de esgoto com um reator de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB- *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), onde o biogás gerado é queimado antes do lançamento à atmosfera. O reator UASB opera com uma vazão média de 205,2 m<sup>3</sup>/dia de efluentes industriais e domésticos, com concentrações médias de DQO de 3.054 mg/L e

eficiência de remoção da carga orgânica de 83%. Nessas condições, o reator tem um potencial de produção de 48.350m<sup>3</sup>/ano de biogás, correspondendo a 5,60 m<sup>3</sup>/h.

Em função do potencial de produção de biogás e das características das instalações da fábrica, este artigo tem como objetivo estudar dois cenários para o aproveitamento desse gás em forma de energia. Para isso, foram seguidas as seguintes etapas:

- escolha e elaboração dos cenários;
- levantamento de custo e do investimento;
- cálculo da receita obtida para cada cenário;
- análise do tempo de retorno do investimento.

Foram propostos pela própria empresa dois cenários para o aproveitamento do biogás, sendo um para a geração de eletricidade e, outro, para a queima em caldeiras. Esses cenários foram elaborados em função da possibilidade de utilização do biogás na própria empresa, sob a forma de eletricidade, utilizando um motorgerador, e levando em consideração a existência de duas caldeiras a gás natural (GN) para geração de vapor.

Para a elaboração dos cenários e obtenção dos custos de investimento foram coletadas informações na literatura e com os fornecedores, para levantamento dos materiais, equipamentos, especificações, quantidade, custo de manutenção e preço. Algumas informações referentes aos cenários para geração de eletricidade foram adquiridas nas empresas: Cia Caetano Branco, Contech, Brasmetano, ER-BR e Grupo Fockink. As informações necessárias para investimentos para queima em caldeiras foram obtidas através de uma proposta técnica/comercial, emitida pela empresa Teccalor, que é especializada neste tipo de tecnologia.

A receita do cenário de geração de eletricidade é obtida pelo produto da tarifa de energia pela energia gerada pelo motorgerador, conforme equação 1. Para isso, foi considerada a tarifa de eletricidade homologada pela ANEEL para a concessionária ESCELSA entre os períodos de 07/08/2013 a 06/08/2014.

$$R_E = Q_E \times T \quad (1)$$

Em que:

$R_E$  = Receita pela geração de eletricidade (R\$/ano)

$Q_E$  = Quantidade de energia elétrica gerada anualmente (KWh/ano);

$T$  = Tarifa de eletricidade da concessionária (R\$/KWh)

A quantidade de energia elétrica gerada anualmente é calculada conforme a equação 2.

$$Q_E = n \times t \times P \quad (2)$$

Em que:

$Q_E$  = Quantidade de energia elétrica gerada anualmente (KWh/ano);

$n$  = Número de dias de operação do motorgerador (dias/ano);

$t$  = Horas de trabalho do motorgerador (h/dia);

$P$  = Potência líquida do motorgerador (KWh)

A receita do cenário para a queima em caldeira provém da redução da despesa obtida pela substituição do gás natural pelo biogás. A receita foi calculada pela Equação 3, considerando a tarifa de gás natural obtida na Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE), no dia 01/04/2014.

$$R_B = B_E \times T_{GN} \quad (3)$$

Em que:

$R_B$  = Receita gerada pela substituição do GN (R\$)

$B_E$  = Produção de biogás equivalente ( $m^3$ /ano);

$T_{GN}$  = Tarifa do GN da concessionária (R\$/ $m^3$ )

A produção de biogás equivalente é a conversão da produção total do biogás no reator em gás natural (GN), levando em consideração a proporção entre o poder calorífico inferior (PCI) destes gases. Considerando que 1  $m^3$  de GN tem um PCI de 9.400 Kcal/ $m^3$  e do biogás de 5.500 Kcal/ $m^3$ , verifica-se uma proporção em que 1 $m^3$  de GN é equivalente a 0,58  $m^3$  de biogás (ICLEI, 2010; IANNICELLI, 2008), conforme apresentado na equação 4.

$$F = \frac{5.500 \text{ Kcal}}{9.400 \text{ Kcal}} = 0,58 \text{ m}^3 \text{ de biogás} \quad (4)$$

Sendo assim, a conversão do biogás para gás natural foi realizada utilizando a Equação 5.

$$B_E = P_B \times F \quad (5)$$

Em que:

$B_E$  = Biogás equivalente ( $m^3$ /ano);

$P_b$  = Produção de biogás do reator ( $m^3$ /ano);

$F$  = Fator de conversão (0,58  $m^3$ ).

O lucro para cada investimento foi obtido pela diferença entre a receita e os custos envolvidos. A análise do tempo de retorno foi necessária para verificar se os investimentos propostos superam os custos envolvidos dentro de um período

aceitável. Para isso, foi montado um fluxo caixa descontado, que visa verificar o tempo de retorno do investimento (*Pay Back*). A taxa de desconto escolhida foi de 10,65%, baseada no Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) (BANCO CENTRAL, 2014).

## 5.2.3 Resultados e Discussão

### 5.2.3.1 Aproveitamento do Biogás para Geração de Eletricidade

O primeiro cenário estudado foi o aproveitamento do biogás para a geração de eletricidade, no qual utilizou-se como referência um motorgerador de 9,5 KVA. Esse equipamento foi selecionado em função do consumo de biogás, necessitando de um pequeno gasômetro para mantê-lo em operação. O sistema é interligado por tubulações de inox, com válvulas e pontos de amostragem de biogás, além de um medidor de vazão especificado neste artigo, que registra a concentração de metano, temperatura e pressão. Na figura 20, pode-se visualizar o esquema básico para aproveitamento do biogás

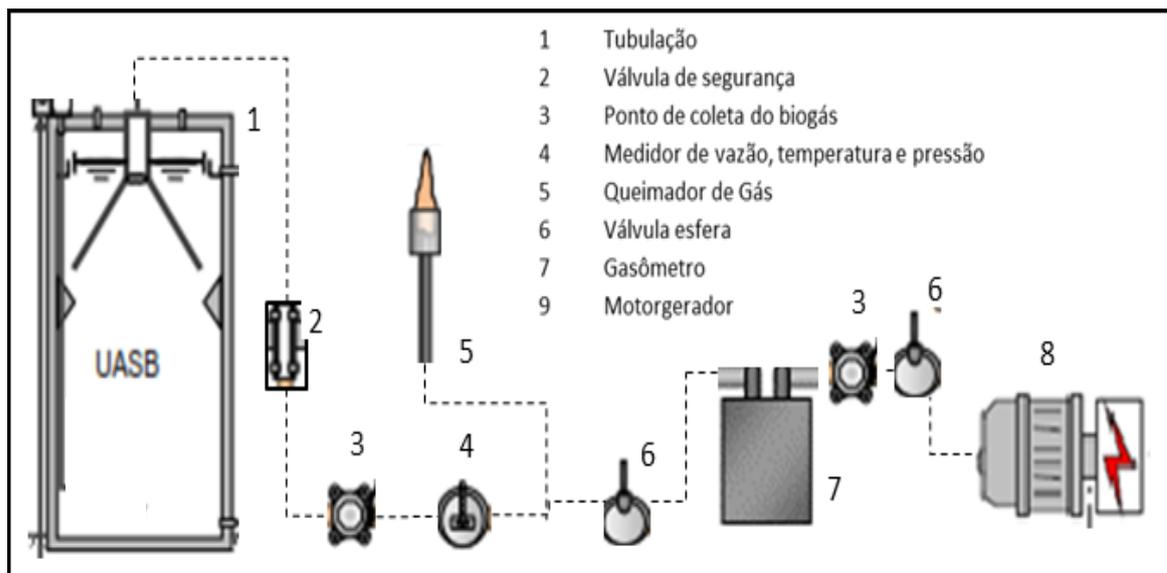


Figura 20 - Ilustração do Cenário para geração de eletricidade

Fonte: Adaptado (PECORA, 2006)

Os equipamentos necessários para montagem do cenário foram baseados em estudos de Pecora (2006) e levantamento junto aos fornecedores. Na Tabela 19 são apresentados os preços dos equipamentos e as quantidades necessárias para o cenário proposto, totalizando um investimento de R\$ 29.738,00.

Tabela 19 - Estimativa dos valores dos equipamentos para o cenário de geração de eletricidade

<b>Materiais</b>	<b>Modelo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unitário (R\$)</b>	<b>Total (R\$)</b>
Tubulação (*)	Aço Inox	8 metros	60	480
Válvula de segurança (*)	Aço Inox	1	240	240
Ponto de coleta do biogás (*)	Aço Inox	2	150	300
Medidor de vazão, temperatura e pressão	TERMAL FT2 CONTECH	1	8.925	8.925
Válvula esfera (*)	Aço Inox	2	240	480
Gasômetro (*)	Gasômetro PVC (10m <sup>3</sup> )	1	4.704	4.704
Motorgerador	B4T-10000 BIOFLEX	1	14.609,59	14.609
<b>TOTAL INVESTIMENTO</b>				<b>29.738</b>

(\*) Dados baseados em projetos de pesquisa de Pecora (2006)

O motorgerador de 9,5 KWh selecionado é dimensionado para trabalhar com 4m<sup>3</sup>/h de biogás com concentração mínima de 60% de metano. A limpeza do gás é realizada por filtros que acompanham o motorgerador, proporcionando a retirada do gás sulfídrico. A especificação do motorgerador é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 - Especificação do Motor Gerador

Modelo/Fabricante	B4T-10000 BIOFLEX/BRANCO
Garantia	6 meses
Motor	18,0 cv
Potência máxima	9,5 KVA
Potência nominal	8,0 KVA
Rotação	3600 rpm
Tensão de saída	110 V / 220 V (bivolt)
Sistema de partida	Partida elétrica
Outros	Sistema de filtro integrado que permite a conexão do motor diretamente na lona do biodigestor.
Consumo	4,0 m <sup>3</sup> de biogás por hora de trabalho; 3,8 l de álcool por hora de trabalho.

Fonte: adaptado de CAETANO BRANCO (2014).

Foi considerada uma taxa de 10% do valor do motorgerador para possível recondicionamento do motor a cada 12 meses ou 5.000 horas de operação. Segundo Amador (2000), uma vez cumprido o número de horas de funcionamento do motorgerador, restam algumas possibilidades: substituir todo o grupo, substituir o motor ou recondicioná-lo. O custo do recondicionamento do motor pode ser expresso por um percentual do custo de investimento inicial do motorgerador, estando entre 10 e 25% deste valor.

Na Tabela 21, observam-se os componentes, os períodos de manutenção, a inspeção e os custos de manutenção do motorgerador para um período de 5.000h/ano. O custo total de manutenção ficou em R\$ 5.315,00, considerando uma retífica para o final desse período.

Tabela 21 - Custo da manutenção preventiva no motorgerador

<b>Manutenção</b>	<b>Período</b>	<b>Custo Unitário</b>	<b>Custo Vida Útil/ano</b>
Troca do óleo do motor	A cada seis meses ou 1.000 horas	R\$ 101,00	R\$ 505,00
Troca do filtro de ar	A cada três meses ou 500 horas	R\$ 15,00	R\$ 150,00
Troca do filtro de biogás	A cada seis meses ou 1.000 horas	R\$ 80,00	R\$ 400,00
Verificação da folga das válvulas e troca	A cada 12 meses ou 5.000 horas	R\$ 1.460,	R\$ 1.460,00
Limpeza do cabeçote	A cada 1.000 horas	R\$ 700,00	R\$ 2.800
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 5.315,00</b>

Fonte: CAETANO BRANCO (2014).

O fabricante do motorgerador recomenda que, a cada 4 horas, o equipamento fique parado por uma hora, evitando superaquecimento (CAETANO BRANCO , 2014), dessa forma considera-se que este equipamento funcionará cerca de 20 horas/dia.

A escolha do gasômetro foi baseada nos estudos de Pecora (2006) que estima uma autonomia de aproximadamente 2 horas de operação para o motorgerador, além de suportar possíveis variações durante a produção do biogás. O gasômetro é confeccionado em PVC, possui duas camadas e um volume útil de 10 m<sup>3</sup>, com dimensões de 2,0 x 3,2 metros. Tais características favorecem sua instalação, considerando o espaço reduzido disponível na empresa em estudo.

Considerando uma vazão constante de 5,60m<sup>3</sup>/h de biogás, o motorgerador pode produzir cerca de 58.400 Kwh/ano, podendo obter uma receita de R\$ 20.296,00/ano. Com um custo de manutenção de R\$ 5.315/ano, pode-se alcançar uma economia de R\$14.981,00/ano. O memorial de cálculo do potencial de geração de eletricidade, receita e lucro pode ser acompanhado na Tabela 22.

Tabela 22 - Memorial de cálculo para a estimativa da receita esperada para o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade

DESCRIÇÃO	CÁLCULOS	RESULTADOS
Dias de Operação (dias/ano)	$n$	364
Horas de Operação (h/dia)	$t$	20
Valor de Investimento (R\$)	Ver Tabela 19	29.738,00.
Potência Líquida (Kwh)	$P$	8,0
Cálculo da Energia Gerada (Kwh/ano)	$Q_E = n \times t \times P$	58.400,00
Tarifa de energia elétrica (R\$)	$T$	0.34754
Receita do Biogás (R\$/ano)	$R_E = Q_E \times T$	20.296,00
Custo de manutenção (R\$/ano)	CM - Ver Tabela 21	5.315,00
Lucro (R\$/ano)	$L = R_E - CM$	14.981,00

(\*) Tarifa homologada pela ANEEL para a concessionária ESCELSA entre os períodos de 07/08/2013 a 06/08/2014.

Para verificar o tempo de retorno do investimento (*Pay Back*), foi considerada uma taxa SELIC de 10,65% (BANCO CENTRAL, 2014), montando um fluxo caixa conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Fluxo caixa para retorno de investimento para o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade

ANO	FLUXO CAIXA ANUAL	FLUXO CAIXA	FLUXO CAIXA VALOR DESCONTADO	CAIXA VALOR DESCONTADO ACUMULADO
0	-R\$ 29.738,00			
1	-	R\$ 14.981,34	R\$ 13.539,39	-R\$ 16.198,61
2	-	R\$ 14.981,34	R\$ 12.236,23	-R\$ 3.962,38
3	-	R\$ 14.981,34	R\$ 11.058,50	R\$ 7.096,12

Na Tabela 23, observa-se que o *PayBack* está entre os 2º e o 3º ano, sendo assim, calcula-se o período exato conforme a equação 6. Em 2 anos e 4 meses a empresa conseguirá recuperar o investimento realizado.

$$\textit{Payback} = 2 + \frac{3.962,38}{11.058,50} \times 12 = 2 \text{ anos e } 4 \text{ meses} \quad (6)$$

Em virtude dos resultados encontrados, foi realizada outra pesquisa de mercado, em várias empresas especializadas (Brasmetano, ER-BR, Grupo Fockink e Biogás Motores Estacionários), para verificar outros motorgeradores disponíveis com maior potência para o cenário apresentado nesse item. Todos os especialistas relataram que a produção de biogás da empresa em estudo é muito baixa (5,60 m³/h) para a utilização em geração de energia com um rápido retorno dos investimentos, principalmente pela necessidade de armazenamento do biogás em gasômetro, o que exigiria um alto investimento e grande área para implantação, pois o gás em pressão atmosférica ocupa muito espaço, inviabilizando sua aplicação.

#### 5.2.3.2 *Aproveitamento do Biogás para Geração de Calor*

Neste item, foi estudado um cenário para a geração de calor, especificamente utilizando o biogás gerado no reator UASB diretamente na caldeira. A empresa em estudo possui duas caldeiras a gás natural em suas instalações, que produzem cerca de 35.239 Kg de vapor por ano. O vapor é imprescindível nos processos de fabricação de chocolate, sendo responsável por sua cocção e pelo controle de temperatura de equipamentos e tubulações, permitindo o transporte e o armazenamento do produto em sua forma líquida.

As caldeiras consumiram em 2013 cerca de 2.756.938 Nm³/ano de gás natural para geração de vapor. O gás natural (GN) é fornecido pela Petrobrás, com uma tarifa de R\$1,1923/m³ (ASPE, 2014), logo, a empresa tem um gasto anual de aproximadamente R\$ 3.287.097,00.

Uma das vantagens de se utilizar o biogás gerado no tratamento anaeróbico para queima em caldeiras é a pequena distância entre estas unidades, conforme apresentado na figura 21.



Figura 21 - Vista do Reator UASB e as caldeiras da fábrica em estudo.

Com base nas estimativas de produção de biogás no reator UASB (cerca de 49.020,00m<sup>3</sup>/ano) foi realizada uma pesquisa de mercado para verificar as possíveis tecnologias para o aproveitamento desse gás em caldeiras. A empresa Teccalor, localizada na Rua José Epaminondas de Oliveira, 144 - Tatuapé, São Paulo, apresentou uma proposta técnica/comercial com os principais equipamentos a serem utilizados no cenário proposto, com um custo de implantação de R\$ 107.000,00 (cento e sete mil reais). De acordo com a empresa Teccalor, o sistema é composto por 03 módulos, contendo:

- sistema de captação, tratamento e bombeamento de biogás para alimentação do sistema de combustão;
- sistema de combustão para o aproveitamento energético do biogás na caldeira;
- *flare* para a segurança do biodigestor / reator / gasômetro.

O *sistema de captação*, tratamento e bombeamento de biogás é composto por um compressor *booster* acionado por motor elétrico e comandado por pressostatos, que ajustam a pressão interna da rede em função da quantidade de biogás disponibilizado para a queima. O conjunto é constituído basicamente por painel de comando elétrico, sistema de segurança por sobrepressão, controle por pressostatos, além de válvulas acionadas automaticamente através de ar comprimido quando o compressor *booster* estiver inoperante, ou o volume do gás se tornar excessivo.

O *sistema de combustão* é composto por um queimador projetado e desenvolvido especificamente para o ponto ideal de consumo, sempre considerando que o atual sistema não deve perder suas características originais. A finalidade do sistema é queimar o biogás, agregando de forma eficiente a energia disponibilizada. Todo esse sistema de combustão a gás atende rigorosamente à norma ABNT 12.313 - edição 09/00, que estabelece que todos os dispositivos de segurança empregados nas instalações de sistemas de combustão sejam produzidos especificamente para o uso com gás combustível e que possuam atestado de desempenho para a finalidade para a qual serão utilizados (ABNT, 2000).

O *sistema de flare* deve ser utilizado como válvula de segurança do biodigestor para os casos de impossibilidade de queima do biogás nas caldeiras, mas a compra deste equipamento não será necessária, pois a empresa já possui um sistema em operação.

O sistema para limpeza do biogás não foi contemplado na proposta comercial, pois depende da análise das concentrações de H<sub>2</sub>S para determinar a melhor tecnologia de purificação, já que os investimentos oscilam de acordo com o nível de impureza e restrições dos equipamentos. Os limites de H<sub>2</sub>S aceitáveis para a queima direta do biogás em caldeiras devem ser inferiores a 1000ppm (CHAMBERS e POTTER, 2000).

Para o dimensionamento do sistema, foi considerada a concentração do metano, do oxigênio, do gás carbônico, do sulfeto de hidrogênio, a vazão do biogás e o poder calorífico inferior (PCI), conforme apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Características do biogás para dimensionamento

<b>CH<sub>4</sub></b>	60%
<b>O<sub>2</sub></b>	1,70%
<b>CO<sub>2</sub></b>	40%
<b>H<sub>2</sub>S</b>	<1000 ppm
<b>Vazão do biogás disponível</b>	5,6 m <sup>3</sup> /h
<b>P.C.I. (estimado)</b>	5.500 kcal/m <sup>3</sup>

O cenário proposto para a queima do biogás em uma das caldeiras da fábrica em estudo pode ser observado na Figura 22. O sistema de purificação apresentado é apenas ilustrativo, não será contemplado nos custos de investimento, conforme comentado anteriormente.

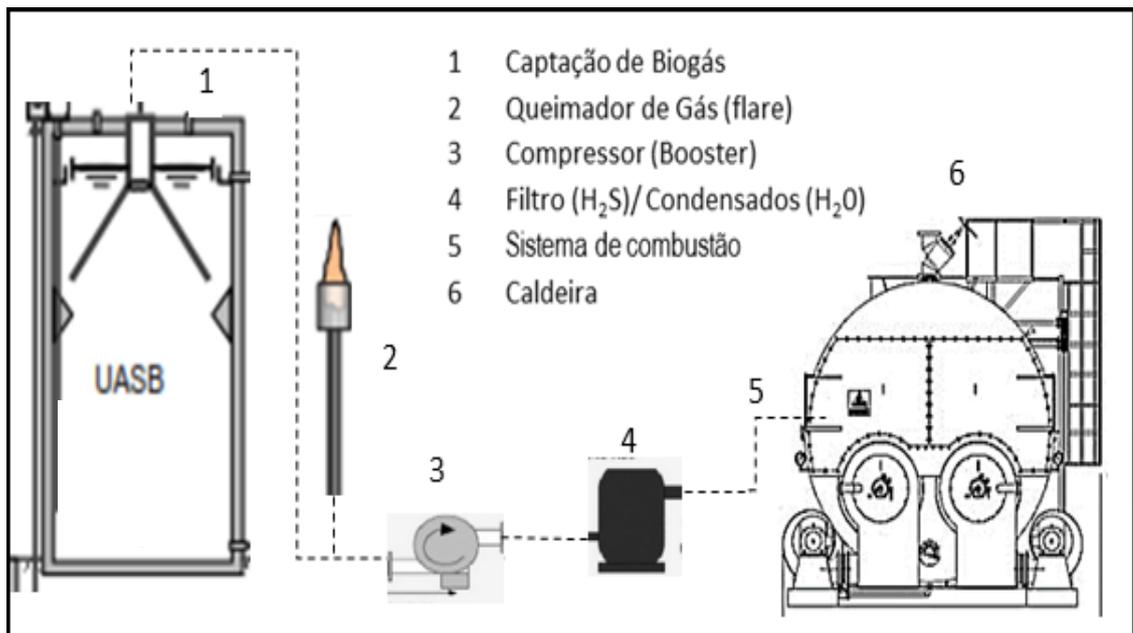


Figura 22 - Ilustração do cenário para geração de vapor

Partindo do princípio de que a caldeira e o tratamento anaeróbico fazem parte dos processos da fábrica, os custos de operação e manutenção desses equipamentos não foram considerados. Porém, foram contemplados gastos com a assistência técnica anual, no valor R\$ 1.500,00, para a verificação do sistema fornecido pela empresa Teccalor.

Nesta etapa, foi necessário considerar a conversão do biogás em GN para calcular a receita e o retorno dos investimentos do projeto. Para uma produção estimada de 49.020,00 m<sup>3</sup> de biogás por ano no reator em estudo, estima-se uma equivalência de 28.431 m<sup>3</sup> de GN, utilizando o fator de conversão de 0,58. O memorial de cálculo da receita esperada com o investimento no cenário proposto pode ser acompanhado na Tabela 25.

Tabela 25 - Memorial de cálculo para a estimativa da receita esperada para o aproveitamento do biogás em caldeiras

DESCRIÇÃO	CÁLCULOS	RESULTADOS
Produção de biogás (m <sup>3</sup> /ano)	$P_B$	49.020,00
Fator de conversão	$F$	0,58
Vazão do biogás convertido (m <sup>3</sup> /ano)	$B_E = P_B \times F$	28.431,00
Tarifa do GN (R\$/m <sup>3</sup> )	$T_{GN}$	1,19
Receita do biogás (R\$/ano)	$R_B = B_E \times T_{GN}$	34.040,00
Custo de manutenção (R\$/ano)	$CM$	1.500,00
Lucro (R\$/ano)	$L = R_B - CM$	32.540,00

Para verificar o tempo de retorno do investimento (Pay Back), foi considerada como referência a taxa SELIC de 10,65% (BANCO CENTRAL, 2014), montando um fluxo caixa conforme apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Fluxo caixa para retorno de investimento para o aproveitamento do biogás em caldeiras

Ano	Fluxo caixa anual	Fluxo caixa	Fluxo caixa descontado	Fluxo caixa descontado acumulado
<b>0</b>	-R\$ 107.000,00			
<b>1</b>	-	R\$ 32.539,84	R\$ 29.407,89	-R\$ 77.592,11
<b>2</b>	-	R\$ 32.539,84	R\$ 26.577,40	-R\$ 51.014,70
<b>3</b>	-	R\$ 32.539,84	R\$ 24.019,34	-R\$ 26.995,36
<b>4</b>	-	R\$ 32.539,84	R\$ 21.707,49	-R\$ 5.287,87
<b>5</b>	-	R\$ 32.539,84	R\$ 19.618,16	R\$ 14.330,29

Na Tabela 26, observa-se que o *Pay Back* está entre os 4<sup>o</sup> e o 5<sup>o</sup> ano, sendo assim, calcula-se o período exato conforme equação 7. Em 4 anos e 3 meses a empresa conseguirá recuperar o investimento realizado.

$$\text{Payback} = 4 + \frac{5.287,87}{19.618,16} \times 12 = 4 \text{ anos e 3 meses} \quad (7)$$

#### 5.2.4 Conclusão

Este artigo propôs estudar dois cenários para o aproveitamento energético do biogás gerado no tratamento anaeróbico em uma fábrica de chocolate, considerando a capacidade de produção do biogás, o levantamento de custo para o investimento e a análise tempo de retorno.

Os resultados dos estudos do cenário para a geração de energia elétrica através de um sistema de motorgerador de 9,5KWh a biogás, operando a 20 h/dia, indicam uma produção de 58.400,00 Kwh/ano e a obtenção de uma receita de R\$20.296,00/ano. Descontando os custos de manutenção de R\$ 5.315/ano, pôde-se obter uma economia de R\$ 14.981,00/ano. Os investimentos necessários foram de R\$ 29.738,00, sendo recuperados em 2 anos e 4 meses.

Os estudos do cenário para a utilização do biogás na geração de vapor em uma caldeira consideraram que a produção do biogás gerado durante o tratamento anaeróbico (49.020 m<sup>3</sup>/ano) é equivalente a 28.431 m<sup>3</sup>/ano de GN. Sendo assim, o biogás representa uma economia de 1,02 % em GN em relação ao consumo real nas caldeiras, ganho significativo quando relacionado aos gastos anuais, que chegam a R\$ 3.287.097. Logo, em termos financeiros, a empresa teria uma economia de aproximadamente R\$ 32.540/ano, que favorece a recuperação do investimento de R\$ 107.000,00 em 4 anos e 3 meses.

Este cenário destaca-se, por várias razões, como a proximidade entre a estação de tratamento de efluentes e as caldeiras; o tempo de retorno do investimento aceitável; a utilização de uma fonte de energia inerente ao tratamento dos efluentes; o baixo custo de manutenção; a substituição de combustível fóssil.

Comparando os dois cenários, verifica-se que, apesar dos investimentos para geração de eletricidade serem menores, o cenário para utilização de biogás nas caldeiras traz maior retorno financeiro, com economia de gás natural. Desta forma, os resultados deste artigo demonstram que o aproveitamento do biogás para a queima nas caldeiras da fábrica é a alternativa mais indicada, devido a sua viabilidade econômica e à disponibilidade de tecnologias no mercado.

### 5.2.5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12313**: Sistema de combustão - controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura. Rio de Janeiro, 2000.

ALM, P. *et al.* Sleeman biogas boiler system design. **Studies by Undergraduate Researchers at Guelph**, v.5, 63-68, 2011.

AMADOR, J. **Análisis de los parámetros técnicos en la aplicación de los sistemas de información geográfica a la integración regional de las energías renovables en la producción descentralizada de electricidad**, 2000. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha, 2000.

APPELS, L. *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, 755-781, 2008.

ASPE. **Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo**, 2014. Disponível em: <<http://www.aspe.es.gov.br/default.asp>>. Acesso em: 22 mar. 2014.

AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental**, 2001. 111 p. tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UNESP. São Paulo, 2001.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. 2014. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br/paginas/default.aspx>>. Acesso em: 22 mar. 2014.

CIA CAETANO BRANCO. 2014. Disponível em: <<http://www.branco.com.br/produtos/bio-solucoes/b4t-10000-bioflex/>>. Acesso em: 20 mar. 2014.

CHAMBERS, A. K.; POTTER, I. Gas utilization from sewage waste. **Carbon and Energy Management**, Alberta, v. 23, 12, 2000.

CIOTOLAA, R. J.; LANSINGB, S.; MARTIN, J. F. Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters. **Ecological Engineering**, Columbus, v. 37, Novembro 2011. 1681–1691.

COSTA, D. F. D. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás do Tratamento de Esgoto**, 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DUDEK, J. *et al.* **Landfill Gas Energy Technologies**. Kraków: Instituto Naft I Gazu, 2010. Disponível em: <[https://www.globalmethane.org/Data/1022\\_LFG-Handbook.pdf](https://www.globalmethane.org/Data/1022_LFG-Handbook.pdf)>. Acesso em: 20 Abril 2014.

IANNICELLI, A. L. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria**, 2008, 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

ICLEI. **Manual para Aproveitamento de Biogás - Efluentes Urbanos**. SÃO PAULO: ICLEI - Brasil - Governos Locais pela Sustentabilidade, v. 2, 2010.

JENSEN, J. K.; GOVINDAN, K. Assessment of renewable bioenergy application: a case in the food supply chain industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, 254–263, 2014.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de Caso**. 2006. 76 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, SP, 2006..

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation – A review. **Energy Conversion and Management**, Finlândia, 3369-3375, 2011.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **RENABIO - Rede Nacional de Biomassa para Energia**, 2006. Disponível em: <<http://www.renabio.org.br/06-B&E-v2-n1-2005-p557-67.pdf>>. Acesso em: 27 Maio 2013.

SCHOENA, E. J.; BAGLEY, D. M. Biogas production and feasibility of energy recovery systems for anaerobic treatment of wool-scouring effluent. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 62, 21-30, 2012.

SURENDRA, K. C. *et al.* Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Honolulu, v. 31, 846–859, 2014.

TECCALOR. Utilização de Biogás em Caldeiras. **TECCALOR**, 2014. Disponível em: <<http://www.teccalor.com.br/utilizacao-de-biogas.html>>. Acesso em: 23 mar. 2014.

USEPA. Adapting Boilers to Utilize Landfill Gas: An Environmentally and Economically. **Landfill Methane Outreach Program (LMOP)**, Washington, p. 5, 2009. Disponível em: <<http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/boilers.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2014.

WIRTHA, S. *et al.* Informal institutions matter: Professional culture and the development of biogas technology. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 8, 20-41, 2013.



## 6 CONCLUSÃO GERAL

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica na unidade de tratamento de esgoto de uma fábrica de chocolate, com o intuito posterior de utilizá-los como fonte de energia.

Os objetivos específicos foram distribuídos em dois artigos de forma a responder as principais perguntas da pesquisa.

Quanto ao primeiro objetivo específico, “Avaliar a eficiência da remoção da carga orgânica do sistema de tratamento de efluentes em estudo”, conclui-se que:

- a fábrica de chocolate gera efluentes com altas taxas de matéria orgânica, com valores médios de 3.054,1 mg/L;
- os resultados apresentados indicam que o reator UASB pode atingir 83% de remoção de carga orgânica em condições normais de operacionalidade, com níveis constantes de emissões de carga orgânica;

Quanto ao segundo objetivo específico, “Analisar os potenciais teóricos de produção de biogás e de metano a partir da remoção da DQO”, conclui-se que:

- os resultados apresentados demonstraram que no reator UASB gera-se cerca de 49.020 m<sup>3</sup> de biogás por ano para aproveitamento, correspondendo a 5,60m<sup>3</sup>/h, em função da geração de matéria orgânica de sua boa eficiência de remoção da DQO dos efluentes da fábrica;
- os testes estatísticos de normalidade realizados nos dados da DQO, da vazão do efluente e da eficiência de remoção da carga orgânica apresentaram resultados com baixa variabilidade e demonstram que as médias futuras desses dados têm 95% de probabilidade de estarem em um intervalo de confiança, já calculado neste estudo. Sendo essas variáveis fundamentais para realização dos cálculos para a estimativa da produção do biogás, conclui-se que a geração desse gás pode ocorrer de forma contínua.

Quanto ao terceiro objetivo específico, “Estudar cenários sustentáveis para aproveitamento do biogás gerado em tratamento de efluentes de uma fábrica de chocolate”, conclui-se que:

- os resultados dos estudos do cenário para a geração de energia elétrica através de um sistema de motorgerador de 9,5KWh a biogás, operando a 20 h/dia, indicam uma produção de 58.400Kwh/ano e a obtenção de uma receita de R\$ 20.296,00/ano. Descontando os custos de manutenção de R\$ 5.315/ano, pôde-se obter uma economia de R\$14.981,00/ano. Os investimentos necessários foram de R\$ 29.738,00, sendo recuperados em 4 anos e 4 meses;
- Os estudos do cenário para a utilização do biogás na geração de vapor em uma caldeira consideraram que o aproveitamento do biogás gerado durante o tratamento anaeróbico é equivalente a 28.431 m<sup>3</sup>/ano de GN. Sendo assim, o biogás representa uma economia de 1,02 % em GN em relação ao consumo real nas caldeiras. Logo, em termos financeiros, a empresa teria uma economia de aproximadamente R\$ 32.540,00/ano, que favorece a recuperação do investimento de R\$ 107.000,00 em 4 anos e 3 meses;
- comparando os dois cenários, verifica-se que, apesar dos investimentos para geração de eletricidade serem menores, o cenário para utilização de biogás nas caldeiras traz maior retorno financeiro com economia de gás natural;
- os resultados deste artigo demonstram que o aproveitamento do biogás para a queima nas caldeiras da fábrica é a alternativa mais indicada neste caso, devido a sua viabilidade econômica e à disponibilidade de tecnologias no mercado.

Ressalta-se que os conceitos atuais de sustentabilidade envolvem três dimensões: a econômica, a ambiental e a social. A harmonização destes pilares torna-se necessária para que ocorra um crescimento econômico capaz de otimizar e preservar os recursos naturais, satisfazendo as necessidades atuais, sem comprometer as gerações futuras.

O biogás gerado na ETE em estudo traz benefícios que abrangem os três pilares, conforme apresentado na Figura 23, destacando o potencial de realização do Marketing Verde.

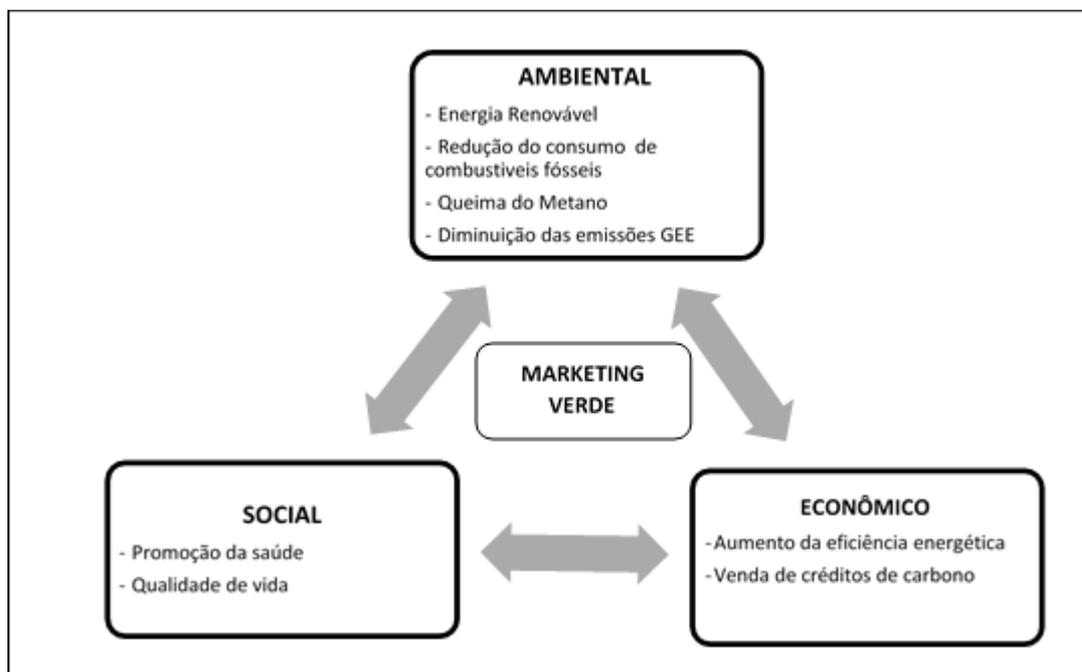


Figura 23: Abrangência do resultado da pesquisa

O Marketing Verde fortalece a imagem da empresa perante a comunidade e clientes, conseguindo relacionar seus produtos à preservação do planeta com iniciativas sustentáveis, podendo colaborar para aumentar a vantagem competitiva. Desta forma, além de conquistar novos clientes, estabelece-se uma relação de parceria em prol da preservação do meio ambiente (HERBES e RAMME, 2014; SHARMAA e IYERB, 2012).

O aproveitamento energético do biogás, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, é uma fonte alternativa de energia, que favorece com a redução ou a substituição dos combustíveis fósseis. Trata-se de uma alternativa estratégica para entidades privadas e públicas para utilização ou venda de energia destes processos, além de favorecer o desenvolvimento tecnológico de empresas de saneamento e energia (ZORIĆ e HROVATIN, 2012)



## 7 RECOMENDAÇÕES

A partir da avaliação dos resultados obtidos no presente trabalho, recomenda-se para a condução de trabalhos futuros:

- avaliar a produção de biogás com medições *in loco*, para validar e/ou complementar os métodos utilizados nesta pesquisa.
- realizar a análise da composição do biogás, a fim de verificar as concentrações dos elementos principais;
- avaliar as perdas de metano dissolvido para refinar as faixas adotadas no método de cálculo de estimativa de produção de biogás e de recuperação de energia em reatores UASB;
- realizar estudos sobre a potencialização da produção de biogás através de aditivos orgânicos no reator UASB.



## 8 REFERÊNCIAS

ABICAB. Associação Brasileira da Indústria de Chocolates, Cacau, Amendoim, Balas e Derivados. **ABICAB**, 2014. Disponível em: <<http://www.abicab.org.br/institucional/historia-abicab/>>. Acesso em: 23 Março 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9800**: Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12313**: Sistema de combustão - controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura. Rio de Janeiro, 2000.

AGRAWAL, L. K.; HARADA, H.; OKUI, H. Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 83, 179-184, 1997.

ALM, P. *et al.* Sleeman biogas boiler system design. **Studies by Undergraduate Researchers at Guelph**, v.5, 63-68, 2011.

AMADOR, J. **Análisis de los parámetros técnicos en la aplicación de los sistemas de información geográfica a la integración regional de las energías renovables en la producción descentralizada de electricidad**, 2000. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha, 2000.

APPELS, L. *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, 755-781, 2008.

ASPE. **Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo**, 2014. Disponível em: <<http://www.aspe.es.gov.br/default.asp>>. Acesso em: 22 mar. 2014.

ASTALS, S. *et al.* Codigestion of Pig Manure and Glycerine: Experimental and Modelling Study. **Journal of Environmental Management**. v. 92, p. 1091-1096, 2011.

AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental**, 2001. 111 p. tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UNESP. São Paulo, 2001.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. 2014. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br/paginas/default.aspx>>. Acesso em: 22 mar. 2014.

BEAL, L. J.; RAMAN, D. R. Sequential Two-Stage Anaerobic Treatment of Confectionery Wastewater. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 76, 211-217, 2000.

BOULAMANTI, A. K. *et al.* Influence of different practices on biogas sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, 149–161, 2013.

CIA CAETANO BRANCO. 2014. Disponível em: <<http://www.branco.com.br/produtos/bio-solucoes/b4t-10000-bioflex/>>. Acesso em: 20 mar. 2014.

CAPSTONE. CAPSTONE MICROTURBINE PERFORMANCE SPECIFICATIONS, 2013. Disponível em: <[http://www.capstoneturbine.com/\\_docs/datasheets/CR30\\_331033F\\_lowres.pdf](http://www.capstoneturbine.com/_docs/datasheets/CR30_331033F_lowres.pdf)>. Acesso em: 08 JUNHO 2013.

CENBIO. **Geração de energia elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto**, JUNHO 2004. Disponível em: <[http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/7\\_purefa.pdf](http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/7_purefa.pdf)>. Acesso em: 31 MAIO 2013.

CETESB. **Manual do usuário do programa computacional do Biogás: Geração e Uso Energético - Efluentes e Resíduos Rurais - Versão 1.0**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006.

CHAMBERS, A. K.; POTTER, I. Gas utilization from sewage waste. **Carbon and Energy Management**, Alberta, v. 23, 12, 2000.

CHERNICHARO, C. A. D. L. **Princípios de Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, v. 5, 2007. 380 p.

CHERNICHARO, C. A. L.; STUETZ, R. M. **Improving the design and operation of UASB reactors for treating domestic wastewater: management of gaseous emissions**. [S.l.]: In: IX Latin American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion, 2008, Eastern Island - Chile, 2008. p. 504-512 p.

CIOTOLAA, R. J.; LANSINGB, S.; MARTIN, J. F. Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters. **Ecological Engineering**, Columbus, v. 37, 1681–1691, 2011.

CNNPA. Resolução -**Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos** (Brasil) - CNNPA nº 12, de 1978. Normas Técnicas Especiais, 1978. Disponível em: <[http://www.anvisa.gov.br/anvisalegis/resol/12\\_78\\_prod\\_confeita.htm](http://www.anvisa.gov.br/anvisalegis/resol/12_78_prod_confeita.htm)>. Acesso em: 28 Abril 2014.

COHEN, K. D. O.; LUCCAS, V.; JACKIX, M. D. N. H. Temperagem ou Pré-Cristalização do Chocolate. **Brazilian Journal of Food Thecnology**, v. 7, p.23-30, 2004.

COSTA, D. F. D. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás do Tratamento de Esgoto**, 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DEZOTTI, M. **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-Papers serviços editoriais LTDA, v. 5, 2008. 360 p.

DUDEK, J. *et al.* **Landfill Gas Energy Technologies**. Kraków: Instituto Naft I Gazu, 2010. Disponível em: <[https://www.globalmethane.org/Data/1022\\_LFG-Handbook.pdf](https://www.globalmethane.org/Data/1022_LFG-Handbook.pdf)>. Acesso em: 20 Abril 2014.

EL-FADEL, M.; MASSOUD, M. Methane emissions from wastewater management. **Environmental Pollution**, Beirute, v. 114, 177-185, 2001.

EL-GOHARY, F. A.; NASR, F. A. & A. H. I. Cost-Effective Pre-treatment of Food Processing Industrial Wastewater. **Water Science and Technology**, v. 40, 17-24, 1999.

ERSAHIN, M. E. *et al.* Anaerobic Treatment of Industrial Effluents: An Overview of Application. In: GARCÍA, F. S. **Waste Water - Treatment and Reutilization**. Istambul: InTech, p. 434, 2011.

ESPARZA-SOTO, M. *et al.* Treatment of a chocolate industry wastewater in a pilot-scale low-temperature UASB reactor operated at short hydraulic and sludge retention time. **Water Science & Technology**, Toluca, México, v. 67, 10, 2013.

GERVASONI, R.; CANTÃO, M. P. Produção de metano a partir da digestão anaeróbia: relação entre teoria e prática. **Espaço Energia: Revista técnico-científica da área de energia**, Paraná, v. 15, 15, Outubro, 2011.

GUERRERO, L.; ALKALAY, D.; KERA, M. Biodegradabilidad anerobia de los efluentes residuales de una fabrica de chocolates. **Seminario taller latinoamericano tratamiento anaerobio de aguas residuales**, Bucaramanga, 1996.

HERBES, C.; RAMME, I. Online marketing of green electricity in Germany—A content analysis of providers' websites. **Energy Policy**, V.66, 257–266, 2014.

IANNICELLI, A. L. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria**, 2008. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

ICLEI. **Manual para Aproveitamento de Biogás - Efluentes Urbanos**. SÃO PAULO: ICLEI - Brasil - Governos Locais pela Sustentabilidade, v. 2, 2010.

IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Wastewater Treatment and Discharge**, v. 5, 2006.

IPCC. **Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Summary for Policymakers.** Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013.

JENSEN, J. K.; GOVINDAN, K. Assessment of renewable bioenergy application: a case in the food supply chain industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, 254–263, 2014.

JOUNG, C. B. *et al.* Categorization of indicators for sustainable manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 24, 148-157, 2013.

LIMA, F. P. **Energia no Tratamento de Esgoto Análise Tecnológica e Institucional para Conservação de Energia e Uso do Biogás**, 2005. 139 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LOBATO, L. C. D. S. **Aproveitamento Energético De Biogás Gerado Em Reatores Uasb Tratando Esgoto Doméstico**, 2011. 186 f. Tese (Doutorado em Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MAKAREVICIENE, V. *et al.* Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation. **Energy Conversion and Management**, v. 75, 224-233, 2013.

MARCOSA, A. *et al.* Environmental treatment of slaughterhouse wastes in a continuously stirred anaerobic reactor: Effect of flow rate variation on biogas production. **Fuel Processing Technology**, v. 103, 178-182, 2012.

MENDES, A. A. *et al.* Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, Março 2005.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reus.** New York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

NAJA, G. M. *et al.* Assessment of biogas potential hazards. **Renewable Energy**, v. 36, 3445–3451, 2011.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, v.5, 93-114, 2006.

OSORIO, F.; TORRES, J. C. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. **Renewable Energy**, v. 34, 2164–2171, 2009.

PATIL, S. A. *et al.* Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. **Tecnologia Bioresource**, V. 100, 5132-5139, 2009.

PAUSS, A.; NAVEAU, H.; NYNS, E. **Biogas production**. New York: Wiley-Interscience publication, 273-291 p, 1987.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de Caso**, 2006. 153 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PNUD. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento; Ministério do Meio Ambiente. SÃO PAULO, p. 56. 2010.

QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants – planning, desing and operation**. 2. ed. New York: CRC PRESS LLC, 1998.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation – A review. **Energy Conversion and Management**, Finlândia, 3369-3375, 2011.

REIS JUNIOR, J. A. **Análise da potencialidade do mercado de projetos de crédito de carbono no Brasil**, Dissertação (Mestrado em Controladoria e Contabilidade) - Departamento de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

RICHTER, M.; LANNES, S. C. D. S. Ingredientes usados na indústria de chocolates. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, São Paulo, v. 43, Jul 2007.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Biomassa e Energia. **Estimativa do potencial degeração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil**, v. 2, 2005. 57-67.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico de Qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 217 p.

SCHOENA, E. J.; BAGLEY, D. M. Biogas production and feasibility of energy recovery systems for anaerobic treatment of wool-scouring effluent. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 62, 21-30, 2012.

SHARMAA, A.; IYERB, G. R. Resource-constrained product development: Implications for green marketing and green supply chains. **Industrial Marketing Management**, v. 41, 599–608, 2012.

SHOW, K. Y.; LEE, D. J. Carbon credit and emission trading: Anaerobic wastewater treatment. **Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers**, v. 39, 557–562, 2008.

SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L. Test results for fuel cell operation on anaerobic digester gas. **Journal of Power Sources**, v. 86, 283-288, 2000.

SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L. Technical assessment of fuel cell operation on anaerobic digester gas at the Yonkers, NY, wastewater treatment plant. **Waste Management**, v. 23, 709-717, 2003.

SURENDRA, K. C. *et al.* Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Honolulu, v. 31, 846–859, 2014.

SUZUKI, R. M. **Composição Química e Quantificação de Ácidos Graxos em chocolates**, 2009. 130 p. Tese (Doutorado em Ciência) - Programa de Pós-Graduação em Química do Departamento de Química do Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

TECCALOR. Utilização de Biogás em Caldeiras. **TECCALOR**, 2014. Disponível em: <<http://www.teccalor.com.br/utilizacao-de-biogas.html>>. Acesso em: 23 mar. 2014.

UNFCCC. UNFCCC. Approved Methodologies for Small Scale CDM Project Activities. Type III, AMS III.H Methane recovery in wastewater treatment (Version 16.0), 2012. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/4ND00PCGC7WXR3LOLOJTS6SVZP4NSU>>. Acesso em: 25 Junho 2013.

USEPA. Adapting Boilers to Utilize Landfill Gas: An Environmentally and Economically. **Landfill Methane Outreach Program (LMOP)**, Washington, p. 5, 2009. Disponível em: <<http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/boilers.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2014.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1994. 222 p.

VILLELA, L. C. H.; FORESTI, E. **Tratamento de esgotos sanitários com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB): desempenho e respostas dinâmicas às sobrecargas hidráulicas**, 1997. 218 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP., 1997.

WIRTHA, S. *et al.* Informal institutions matter: Professional culture and the development of biogas technology. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 8, 20-41, 2013.

ZORIĆ, J.; HROVATIN, N. Household willingness to pay for green electricity in Slovenia. **Energy Policy**, v. 47, 180–187, 2012.

ZUPANČIČ, G. D.; GRILC, V. Management of Organic Waste. In: KUMAR, S.; BHARTI, A. **Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste**. [S.l.]: InTech, 2012. Cap. 1, p. 198.