

KARL HARUO KIMURA DE MORAES

**GERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM BIOGÁS: ESTUDO DE
VIABILIDADE EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO
PARANÁ**

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO-2020

KARL HARUO KIMURA DE MORAES

**GERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM BIOGÁS: ESTUDO DE
VIABILIDADE EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO
PARANÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Kimura de Moraes, Karl Haruo

Geração de eletricidade com biogás: estudo de viabilidade em estação de tratamento de esgoto no Paraná / Karl Haruo Kimura de Moraes; orientador(a), Samuel Nelson Melegari de Souza, 2020.
79 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2020.

1. Estação de tratamento de esgoto. 2. Biogás. 3. Geração de eletricidade. 4. Avaliação econômica. I. Melegari de Souza, Samuel Nelson . II. Título.

KARL HARUO KIMURA DE MORAES

Geração de eletricidade com biogás: Estudo de viabilidade em estação de tratamento de esgoto no Paraná

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a) - Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Elias Lira dos Santos Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Medianeira (UTFPR)

Cascavel, 12 de março de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo suporte em todas as etapas da minha carreira, sempre me apoiando e me incentivando.

À Aparecida Ribeiro dos Santos, minha companheira, sempre ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu professor orientador, Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pela orientação e valiosas contribuições durante a jornada.

Aos demais professores do programa, grandes docentes sempre dispostos à contribuição para a construção do conhecimento.

À Vanderléia L. S. Schmidt sempre disposta na assistência do programa.

Aos demais colegas do programa pela troca de experiências e conhecimentos durante o mestrado.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemático das etapas da digestão anaeróbia.....	13
Figura 2 – Biodigestor modelo RALF/UASB.....	25
Figura 3 - Desenho esquemático do funcionamento de um motor Otto	28
Figura 4 - Mapa com as localizações das cidades de estudo	35
Figura 5 - Estimativa da produção de biogás e estimativa de potencial de geração para geradores de 20% e 30% de eficiência, com relação ao número de habitantes atendidos no esgotamento sanitário.....	47
Figura 6 - Custo específico com linha de tendência em escala de sistema moto geração	49
Figura 7 - Curva de custo específico do sistema por sua capacidade de geração....	50
Figura 8 - VLP e TIR do investimento em Medianeira	55
Figura 9 - VPL e TIR do investimento em Londrina.....	55
Figura 10 - VPL e TIR do investimento em Curitiba	56
Figura 11 - Payback do investimento em Medianeira.....	56
Figura 12 - Payback do investimento em Londrina	57
Figura 13 - Payback do investimento em Curitiba	57
Figura 14 - LCOE das cidades do Paraná.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e composição típica do biogás.	9
Tabela 2 - Necessidade de remoção de compostos gasosos conforme a utilização do biogás.....	15
Tabela 3 - Propriedades físicas e químicas do metano.....	25
Tabela 4 - Poder calorífico de alguns combustíveis.	25
Tabela 5 - Comparação entre diferentes fontes energéticas e biogás.	17
Tabela 6 - Equivalência energética do biogás (1m ³) comparada a outras fontes de energia.	18
Tabela 7 - Consumo de biogás por aplicação.	20
Tabela 8 - Resultado preliminares do desempenho de biodigestores modelos Indiano e Chinês, com capacidade de 5,5 m ³ de biomassa, operados com esterco bovino. .	31
Tabela 9 - Necessidade de remoção de compostos gasosos conforme a utilização do biogás.....	27
Tabela 10 - Lista de cidades do Paraná para o estudo e volume de esgoto coletado.	44
Tabela 11 - Dados de DQO e eficiência de remoção de DQO em reatores tipo UASB.	45
Tabela 12 - Parâmetros econômicos utilizados para os cálculos do custo de geração de eletricidade.	40
Tabela 13 - Vazão de esgoto afluente por quantidade de habitantes.	52
Tabela 14 - Parâmetro utilizados para o cálculo do fator de correção para a temperatura operacional do reator.	52
Tabela 15 - Parâmetros utilizado para o cálculo da quantidade de DQO efetivamente removido pelo reator.	53
Tabela 16 - Parâmetros utilizados para o cálculo para produção de Metano.....	53
Tabela 17 - Potencial de produção de metano.....	54
Tabela 18 - Parâmetros utilizados para o cálculo para potencial elétrico.....	54
Tabela 19 - Potencial de produção de metano e biogás para cada localidade estudada.....	55
Tabela 20 - Variáveis para o cálculo de VPL.....	48

Tabela 21 - Variáveis para o cálculo de VPL.....	50
Tabela 22 - Valores para Fluxo de caixa com 20% de eficiência no motor gerador em Medianeira.....	61
Tabela 23 - Valores para Fluxo de caixa com 20% de eficiência no motor gerador em Londrina.	61
Tabela 24 - Valores para Fluxo de caixa com 20% de eficiência no motor gerador em Curitiba.....	61
Tabela 25 - Valores para Fluxo de caixa com 30% de eficiência no motor gerador em Medianeira.....	62
Tabela 26 - Valores para Fluxo de caixa com 30% de eficiência no motor gerador em Londrina.	62
Tabela 27 - Valores para Fluxo de caixa com 30% de eficiência no motor gerador em Curitiba.....	62
Tabela 28 - VPL, TIR e Payback com eficiência do motor gerador de 20%.....	63
Tabela 29 - VPL, TIR e Payback com eficiência do motor gerador de 30%.....	63
Tabela 30 - Valores para o cálculo de LCOE para motor gerador com 20% de eficiência.	58
Tabela 31 - Valores para o cálculo de LCOE para motor gerador com 30% de eficiência.	67

MORAES, Karl Haruo Kimura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2020. **Geração de Eletricidade com Biogás: Estudo de Viabilidade em Estação de Tratamento de Esgotos no Paraná.** Professor Orientador Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

RESUMO

A geração distribuída de energia elétrica produzida a partir da utilização de resíduos orgânicos é uma alternativa que precisa ser cuidadosamente analisada, devido às inúmeras vantagens associadas a esse processo. Considerando que toda atividade humana consome recursos e que ao final desta convertem-se em rejeitos, podemos classificar o esgoto urbano como resíduo de elevado poder poluidor, sendo o seu tratamento necessário para a comunidade e para o meio ambiente, uma vez que, remove os poluentes da água previamente usada pela população, de forma a devolvê-la aos corpos hídricos em boas condições e, bem como, se empregado um processo anaeróbico controlado, pode-se gerar biogás. Por seu elevado poder calorífico, o biogás tem potencial para ser utilizado com fonte primária para geração de energia elétrica, exigindo, assim, uma avaliação da viabilidade econômica da utilização de motores geradores para o aproveitamento do biogás produzidos nos reatores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) já instalados nas estações de tratamento de esgoto. O levantamento do Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa de Interna de Retorno (TIR), o payback e o custo nivelado da energia surgem como ferramentas apropriadas para realizar tal avaliação, tendo como referência a quantidade de habitantes que a tais estações podem atender. As simulações foram realizadas utilizando, como no caso de estudo, o volume de esgoto tratado de algumas cidades do Estado do Paraná, partindo da quantidade de população atendida com o esgotamento sanitário, assim estimando o potencial de produção de biogás nas estações e, por sua vez, o seu potencial de geração de energia elétrica. O método proposto figurou como ferramenta adequada para apontar e demonstrar a utilização do biogás como recurso energético e benéfico, conforme verifica-se o resultado da cidade de Curitiba que obteve o VPL de 87.834.069,69 reais, uma TIR de 18,04% a.m. com payback de 5 meses, bem como, seu valor de Levelized Cost of Energy (LCOE) de 34,53 R\$/MWh.

PALAVRAS-CHAVE: Estação de tratamento de esgoto, biogás, geração de eletricidade, avaliação econômica.

MORAES, Karl Haruo Kimura. State University of Western Paraná, February 2020. **Electricity Generation with Biogas: Feasibility Study at a Sewage Treatment Plant in Paraná.** Advisor Professor Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

ABSTRACT

The distributed generation of electric energy produced from the use of organic waste is an alternative that needs to be carefully analyzed, due to the countless advantages associated with this process. Considering that all human activity consumes resources and in the end of this they become waste, we can classify urban sewage as highly polluting waste, and its treatment is necessary for the community and the environment, once it removes pollutants from the water previously used by the population, in order to return it to water bodies in good conditions and, if a controlled anaerobic process is used, biogas can be generated. Due to its high calorific value, biogas has the potential to be used as a primary source for electricity generation, thus requiring an evaluation of the economic feasibility of using generator engines for the use of biogas produced by Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactors (UASB) already installed in sewage treatment plants. The survey of the Net Present Value (NPV), the Internal Rate of Return (IRR), the payback and the level cost of energy (LCOE) appear as appropriate tools to carry out such an assessment, having as reference the number of inhabitants that these stations can serve. The simulations were carried out using, as in the case of the study, the volume of treated sewage in some cities in the State of Paraná, based on the amount of population served by sewage, thus estimating the potential for biogas production in the stations and its potential for generating electricity. The proposed method was an appropriate tool to point out and demonstrate the use of biogas as an energy and beneficial resource, as verified by the result of the city of Curitiba, which obtained the NPV of 87,834,069.69 reais, an IRR of 18.04% am with a 5-month payback, as well as its Levelized Cost of Energy (LCOE) value of R \$ 34.53 / MWh.

KEYWORDS: Sewage treatment plant, biogas, electricity generation, eco-economic assessment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral.....	4
1.2 Objetivos específicos:	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Esgotos Sanitários.....	5
2.1.1 Conceituação e características	5
2.1.2 Processo de tratamento	6
2.1.3 Situação de esgotos no Brasil	8
2.2 O Biogás.....	8
2.2.1 Conceituação e características	8
2.2.2 Histórico	9
2.2.3 Processo de formação.....	11
2.2.4 Purificação do biogás	14
2.2.5 Poder calorífico	15
2.2.6 Aplicações do biogás.....	18
2.2.7 Sistemas de produção.....	20
2.2.8 Aspectos econômicos e ambientais	25
2.2.9 Geração de energia elétrica	26
2.2.10 Motor a gás ciclo Otto.....	27
2.3 Matriz Energética.....	30
2.3.1 Matriz Energética Brasileira.....	30
2.3.2 Matriz elétrica	31
2.3.3 Geração Distribuída (GD).....	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 Produção média de esgoto por habitantes no Brasil.....	34
3.2 Carga Orgânica de esgoto afluente de ETEs e eficiência de remoção.....	35
3.3 Cálculo de produção de biogás	36
3.4 Estimativa do potencial de geração de eletricidade	38
3.5 Cálculo de viabilidade econômica	38
3.6 Levelized Cost of Energy (LCOE)	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 Cálculo da quantidade de esgoto por habitantes.....	43
4.2 Cálculo do fator de correção para a temperatura de operação do reator	43

4.3 Cálculo da quantidade de DQO efetivamente removido pelo reator.....	44
4.4 Cálculo da vazão de metano	44
4. 5 Cálculo da estimativa da potência gerada	45
4.6 Estimativa da produção de biogás e potência gerada na ETE.....	46
4.7 Valor presente líquido.....	47
4.8 Levelized Cost of Energy (LCOE)	58
5 CONCLUSÕES	61
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a energia sempre atuou como fator preponderante no desenvolvimento das civilizações. O avanço da urbanização favoreceu o consumo predatório dos recursos naturais potencializado pela busca por novas fontes energéticas capazes de sustentar o estilo de vida emergente (PEREIRA et al., 2012).

A demanda por energia elétrica é crescente em todo mundo, uma vez que o aumento populacional, a dependência a cada vez maior em equipamentos elétricos, que satisfazem diversas necessidades, e a importância da energia elétrica para o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) tem despertado o interesse das nações em formas alternativas de geração de energia elétrica, dentro de um contexto sustentável e não poluente (PEREIRA et al., 2012).

Todo resíduo orgânico, seja ele de origem agrícola, pecuária, industrial, residencial ou dos comércios em geral, se sujeito a um processo de digestão anaeróbia controlada, gera como produto o biogás. Composto por 50 a 75% de metano, o biogás pode ser utilizado para gerar energia, biometano, ou ser queimado para atender a uma demanda térmica (FEAM, 2015; FACHAGENTUR, 2010; BLEY Jr., 2015).

No percorrer de milhares anos, a biomassa atendia a grande parte das necessidades de energia da humanidade. No entanto, com a introdução do uso de combustíveis fósseis, nos meados do século XIX, a sua utilização decaiu nos países industrializados (KLASS, 1998). Com isso, surgiu o carvão sendo a principal fonte primária de na matriz energética mundial, sendo extrapolado pelo petróleo na década de 1960. Entretanto, a biomassa voltou a ser vista após dos choques do petróleo na década de 1970 como um recurso energético viável e doméstico, com grande potencial para amortizar a dependência do petróleo (SMIL, 2002).

Por distintas rotas tecnológicas, moldadas as diversas características físicas e químicas das matérias-primas e da utilização requerida, são utilizadas para transformar a biomassa em um produto energético final. Em meio às tecnologias utilizadas para a exploração da energia da biomassa, a digestão anaeróbica está ganhando espaço na utilização por consentir a recuperação da energia a partir do aproveitamento do biogás e nutrientes, bem como prevenir a poluição ambiental (IEA, 2005).

Desde o século XIX na Índia, o biogás vem sendo utilizado como fonte de energia (CERVI, 2009; CETESB, 2006). Três décadas depois dessa primeira experi-

ência, o biogás foi testado como fonte de energia para um pequeno sistema de iluminação pública na Inglaterra. Mesmo com tal iniciativa, somente no século XX, com a Segunda Guerra Mundial provocando insuficiências energéticas, o biogás volta à tona e conquista espaço (CETESB, 2006).

É notório que umas das fontes renováveis de energia que tem potencial para contribuir com a diversificação da matriz energética nacional é o biogás, assim como poderá reduzir a necessidade de construir grandes centrais elétricas convencionais. Os referidos empreendimentos causam impactos sociais em razão da área ocupada por eles, a proximidade com as áreas urbanas, dentre outros fatores. Do mesmo modo, em torno de 13,5% da energia brasileira é desperdiçada entre geração e consumo, assim como aproximadamente 70% desse total costuma ser perdido no sistema de distribuição (CURADO, 2015). O Brasil evidencia como vantagens para a utilização do biogás como fonte energética a grande quantidade de matéria orgânica de qualidade e o clima adequado, tornando-se uma geração local tendo uma perda reduzida (FURTADO, 2010).

Na Europa, a capacidade instalada em plantas de aproveitamento do biogás é superior a 2000 MW, concentrada principalmente na Alemanha e Reino Unido, enquanto nos Estados Unidos essa capacidade é de cerca de 1000 MW (IEA, 2005). No Brasil, o aproveitamento do biogás ainda é incipiente. Considerando a elevada concentração da população brasileira em grandes centros urbanos e a expressiva produção agropecuária e agroindustrial (e, portanto, de resíduos e efluentes domésticos, agropecuários e agroindustriais), é natural acreditar que o atual aproveitamento do biogás no país está bastante aquém do seu potencial (ZANETTE, 2009).

Com o aumento do consumo de recursos, a urbanização também culminou no aumento da emissão de resíduos e efluentes. Dentre eles, pode-se destacar o volume crescente de esgoto doméstico gerado. Para Costa (2006), a deficiência no tratamento do esgoto doméstico (efluentes líquidos residenciais) é um problema que atinge todo o Brasil. No Estado de São Paulo, que possui aproximadamente 32,5% do PIB do país, o esgoto é coletado nas áreas urbanas, e geralmente não recebe nenhum tipo de tratamento antes de ser despejado “in natura” nos cursos de água.

Com base no levantamento do SNIS (2018), apenas 46% do esgoto no país passa por algum tipo de tratamento. Há ainda 35 milhões de brasileiros sem acesso à água tratada, o que equivale a 17% da população.

Pecora (2006) destaca que a geração de resíduos sólidos urbanos, efluentes industriais ou comerciais e resíduos rurais são diretamente proporcionais à quantidade de habitantes e seus hábitos de consumo. A coleta, tratamento e disposição adequada destes resíduos se refletem na qualidade de vida da população e das águas superficiais e subterrâneas.

No entanto, o esgoto doméstico não deve ser considerado apenas como um causador de impactos ambientais, mas também como uma alternativa na geração de energia de forma renovável. A partir da degradação anaeróbia da matéria orgânica contida em materiais residuais como resíduos sólidos urbanos, dejetos de animais, efluentes industriais e esgoto sanitário é gerado um gás combustível chamado comumente de biogás (PECORA, 2006).

Para a produção de biogás, pode ser utilizada a matéria orgânica proveniente de resíduos sólidos, esgotos domésticos e resíduos rurais, como subprodutos agroindustriais e dejetos pecuários (CETESB, 2006). O aproveitamento energético de resíduos do processo de tratamento do esgoto objetiva a melhoria do desempenho global dele, reduzindo a emissão de gases efeito estufa, incentivando para aumentar a eficiência energética da estação de tratamento e, conseqüentemente, a viabilidade do saneamento básico do país.

A biodigestão anaeróbia é o processo de decomposição de matéria orgânica por organismos vivos (bactérias) em um meio no qual há ausência de oxigênio. Extremamente importante para a realização de atividades como o tratamento de resíduos (Estações de Tratamento de Esgoto), a digestão anaeróbia é também usada para a geração de biogás (por meio da decomposição de matéria orgânica em biodigestores), uma opção de combustível, principalmente para residências em meio rural (CHERNICHARO, 2007).

A utilização do biogás como fonte primária para geração de energia elétrica também colabora com a redução das emissões de gases de efeito estufa, já que o biogás gerado pela decomposição anaeróbia de matéria orgânica é composto, em sua maior parte, por metano, que contribui 21 vezes mais para o efeito estufa que o dióxido de carbono (CETESB, 2006; BLEY Jr., 2015). Além de metano, o biogás tem em sua formação dióxido de carbono e, por volta de 1 a 5% de gases traços, dentre eles o ácido sulfídrico (BILEY Jr., 2015; COELHO et al., 2006). Assim, nota-se que a utilização do biogás como fonte primária de energia, além do potencial econômico, possui também um grande potencial de caráter ambiental, mostrando que os benefí-

cios de seu uso devem ser analisados de uma maneira global, a fim de se considerar todos os aspectos envolvidos.

Nesse contexto, faz-se necessária o estudo que englobe aspecto de potencial de geração de biogás e a geração eletricidade em estações de tratamento de esgoto urbano sendo, então, realizada uma avaliação econômico-financeira de sua geração e utilização (COELHO et al., 2003).

1.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho de pesquisa é avaliar o potencial de geração de biogás e o seu uso para fins energéticos, compensação no consumo da própria estação de tratamento de esgoto urbano do estado do Paraná e elaborar uma viabilidade econômica no âmbito de Resolução Normativa ANEEL 482/2012.

1.2 Objetivos específicos:

Este trabalho destaca os seguintes objetivos específicos consoantes ao objetivo geral:

- Estimar produção de Biogás em estação de tratamento de esgoto;
- Estimar potencial energético de eletricidade em kW, adjacente às estações;
- Estimar o custo específico do sistema de motor gerador em escala;
- Calcular Valor Presente Líquido (VPL);
- Calcular Taxa Interno de Retorno (TIR);
- Estimar o custo específico nivelado de energia (CLOE);

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Esgotos Sanitários

2.1.1 Conceituação e características

O esgotamento sanitário, segundo definição da norma NBR 9648 (ABNT,1986), é o despejo líquido constituído por esgotos doméstico, comercial, hospitalar, utilidade pública, industrial, de áreas agrícolas, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitárias e outras fontes.

De acordo com Miguel et al. (2004), os esgotos podem ser classificados em:

- Esgoto Sanitário ou Doméstico: é aquele oriundo de residências, estabelecimentos comerciais, instituições ou quais quer edificações que dispõem de instalações de banheiros lavanderias e cozinhas, ou qualquer dispositivo de utilização da água para fins domésticos. Compõem-se essencialmente da água de banho, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão e detergente provenientes de atividades domésticas;
- Esgoto Industrial: é nativo das atividades e processos industriais. Portanto, cada indústria poderá ser considerada individualmente, uma vez que seus efluentes diferem até mesmo em processos industriais similares;
- Esgoto Pluvial: origina-se a partir da água da chuva e, em alguns casos, na lavagem das ruas, pátios, carros, dentre outros.

Os sistemas de coleta e transporte de esgoto podem ser classificados ainda em individuais ou coletivos:

- O sistema individual compreende o atendimento unifamiliar, ou seja, uma única unidade habitacional, usualmente em fossa séptica seguida de dispositivo de infiltração (sumidouro, irrigações superficiais);
- O sistema coletivo compreende as canalizações que recebem o lançamento de esgoto, transportando ao seu destino de forma sanitariamente adequada.

O esgoto é constituído por líquido que contém cerca de 99,9% de água, 0,1% de substâncias minerais e orgânicas em dissolução e em suspensão. É por conta dessa fração de 0,1% que há necessidade de tratar os esgotos (BETTIOL; CAMARGO, 2000).

Para Von Sperling (2016), além dos sólidos, o esgoto possui gases dissolvidos em concentrações variáveis. Entre eles, os mais importantes são o oxigênio (presente na água antes desta diluir o esgoto), o gás carbônico (resultante da decomposição da matéria orgânica), o nitrogênio, o gás sulfídrico e o metano. São encontrados também no esgoto incontáveis organismos vivos, a maioria microscópicos, como as bactérias. Sabe-se que, por um lado, elas são causadoras de doenças (organismos patogênicos) sendo, portanto, prejudiciais ao homem, porém outras são ótimas colaboradoras para o processo de tratamento, sendo a sua presença fundamental para a depuração dos resíduos.

A ausência de tratamento de esgoto pode provocar danos à saúde pública por meio transmissão de doenças que afetam pessoas de todas as idades, sendo as crianças mais prejudicadas. Inúmeras são as doenças causadas pela falta de tratamento de esgoto, dentre elas: poliomielite, diarreia por vírus, ancilostomíase (amarelão), ascaridíase (lombriga), teníase, cisticercose, filariose (elefantíase), esquistossomose e dentre outras. Além disso, são afetados ainda os recursos hídricos, a vida vegetal e animal ao poluir fontes, rio e mares (ZILOTTI, 2012).

2.1.2 Processo de tratamento

Os processos de tratamento têm o objetivo de diminuir o potencial poluidor do esgoto antes que ele retorne ao meio ambiente, geralmente pela separação dos sólidos por meio de processos físicos, químicos e biológicos, existindo vários processos que se diferenciam (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

As Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) são unidades operacionais do sistema de saneamento que especificamente recebe as cargas poluentes do esgoto e devolve o efluente tratado aos corpos d'água como os rios, reduzindo os eventuais impactos ambientais (VON SPERLING, 2016).

O princípio das estações de tratamento é otimizar o processo natural de limpeza que qualquer rio faz. Todo curso d'água possui bactérias que se alimentam da matéria orgânica do esgoto e ajudam a eliminar a sujeira. A diferença é que uma estação de tratamento faz o processo mais rápido. Como ela possui microrganismos em concentração milhares de vezes superior à de um rio, sendo para reproduzir em

algumas centenas de metros a mesma limpeza que um rio demora até 140 quilômetros para fazer, de acordo com Moacir Francisco de Brito (Sabesp).

A etapa inicial do processo padrão para o tratamento de esgoto é a de Gradeamentos que consiste em deter os materiais maiores, tais como: galhos de árvores, objetos conduzidos e arrastados pelo caminho etc.; os quais ficam presos nos sistemas de “gradeamento”, que possui malhas com espaçamentos diferentes em vários níveis. A seguir, o esgoto passa para a etapa de Desarenação, “caixas de areia”. Neste momento, a areia em suspensão no esgoto vai para o fundo do tanque enquanto os materiais orgânicos ficam nas camadas superiores, para a retirada dos materiais sólidos granulares (FUNASA, 2017).

Em seguida, ocorre a etapa nos decantadores primários quando as partículas sólidas são sedimentadas no fundo do tanque. Entretanto, algumas partículas são muito pequenas e não possuem peso suficiente para precipitar. Por isso, é adicionada, no início do processo de tratamento, uma substância coagulante, a fim de unir essas partículas, formando outras maiores e mais densas que consigam sedimentar com seu peso próprio no decantador, formando lodo (FUNASA, 2017).

Depois da formação do lodo por decantação, um processo de centrifugação separa a fase sólida da mistura em uma espécie de peneira, permitindo que o líquido seja armazenado em tanques (FUNASA, 2017).

Estando na etapa de Digestão anaeróbica, o objetivo buscou a estabilização da mistura por meio de processos químicos que atuam no lodo remanescente, neutralizando bactérias e gases nocivos (FUNASA, 2017).

Nesses digestores, os microrganismos anaeróbios consomem a matéria orgânica constituinte do lodo. Assim, ocorre uma diminuição de 35% – 45% em seus sólidos voláteis. O lodo é, então, previamente desidratado e encaminhado para filtros prensa, quando ocorre uma diminuição ainda maior de seu volume. Na fase final, o material é exposto a altas temperaturas nos secadores térmicos, o que força a evaporação de qualquer resquício de água ainda presente no material. Após esse processo, o lodo é encaminhado aos aterros sanitários ou usado como esterco para a agricultura quando permitido. É nos digestores, durante o processo de oxidação da matéria orgânica, que ocorre a liberação de biogás. Geralmente, parte dele é aproveitada como combustível, muitas vezes, para abastecer equipamentos da própria estação de tratamento como, por exemplo, os secadores térmicos (CHERNICHARO, 2007).

2.1.3 Situação de esgotos no Brasil

O ano de 2015 apresentou uma oportunidade histórica e sem precedentes para reunir os países e a população global, bem como decidir sobre novos caminhos, melhorando a vida das pessoas em todos os lugares. Os países tiveram a oportunidade de adotar a nova agenda de desenvolvimento sustentável e chegar a um acordo global sobre a mudança climática, resultando nos novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que se baseiam nos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM).

O Brasil foi um desses países que se comprometeu a seguir a agenda do ODS, sendo que um dos comprometicimentos foi, até 2030, universalizar o acesso à água potável e "alcançar acesso ao saneamento e higiene adequados e equitativos para todos".

O país vem ampliando seu serviço de tratamento de esgoto com muita lentidão. O Plano Nacional de Saneamento Básico, definido em 2007, previa a universalização do serviço até 2033. Entretanto, ainda tem um longo caminho, a perspectiva atual, em função do baixo volume de investimentos que o setor tem recebido nos últimos anos, é que haja um atraso de 30 anos para que a universalização aconteça (TRATA BRASIL, 2019).

A Trata Brasil (2019) destaca que apenas 46% dos esgotos existentes no país recebe algum nível de tratamento, sendo a região Norte a mais prejudicada, com apenas 22 %, e a região Sul com 45,44%. Os dejetos que não passam por esse processo são jogados na natureza, afetando a saúde pública e o meio ambiente, principalmente pela poluição dos rios.

2.2 O Biogás

2.2.1 Conceituação e características

Biogás é uma mistura gasosa resultante da fermentação anaeróbia de material orgânico encontrado em resíduos animais e vegetais, lodo de esgoto, lixo ou efluentes industriais como vinhaça, restos de matadouros, curtumes e fábricas de alimentos (COELHO et al., 2003). A composição típica do biogás tem cerca de 60%

de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio (WEREKOBROBBY; HAGEN, 2000).

As características do biogás dependem da pressão, temperatura, umidade, concentração de metano e concentração de gases inertes e/ou ácidos. Pode ser usado nas condições em que é gerado e, dependendo da aplicação, é necessária a redução da concentração de H₂S, CO₂, redução da umidade ou mesmo a elevação da pressão (ZILOTTI, 2012).

A Tabela 1 apresenta as características e composição típicas do biogás.

Tabela 1 - Características e composição típica do biogás

Parâmetro	Gás de aterros¹	Biogás – Digestão anaeróbica²
Poder calorífico inferior (MJ/Nm ³)	16	23
Metano (%vol)	35-65	53-70
Dióxido de carbono (%vol)	15-50	30-47
Nitrogênio (%vol)	5-40	-
Ácido sulfídrico (ppm)	<100	<1000
Amônia (ppm)	5	<100

¹ Produzido a partir de matéria orgânica de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

² Produzido a partir da matéria orgânica de resíduos agropecuários em reatores anaeróbicos.

Fonte: Persson et al. (2007).

2.2.2 Histórico

Com base nos registros existentes, a história do biogás teve início com estudos realizados em meados de 1600, quando foi documentada a existência de alguma substância inflamável de composição química desconhecida em regiões pantanosas. Já em 1667, Thomas Shirley fez uma descoberta bastante importante para os estudos atuais sobre a produção de metano. Ele observou que a decomposição de matéria orgânica nos pântanos gerava um gás, mas inicialmente não tinha conhecimento sobre sua formação e de que gás se tratava. No entanto, em 1776, o físico italiano Alexandro Volta, após dois anos de pesquisa e experimentos, conseguiu identificar a composição química inflamável, então, denominado de metano (CH₄). No início do século XIX, Ulysse Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbica de uma mistura de esterco e água a 35°C conseguindo obter 100 litros de gás por metro cúbico de matéria. Com isso, vislumbrou-se pela primeira

vez a possibilidade de utilizar este gás como combustível para sistemas de aquecimento e iluminação (SOARES; SILVA, 2010).

No ano de 1859, foi construída a primeira instalação destinada a produzir e utilizar o biogás em grande escala em um hospital para portadores de hanseníase na cidade Bombaim, na Índia. Na mesma época, pesquisadores como Schrader e Fischer, na Alemanha, estabeleceram as bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbia. Em 1890, Donald Cameron projetou uma fossa séptica em Exter, na Inglaterra, sendo o gás produzido utilizado para iluminação pública. O entusiasmo inicial que o projeto atingiu motivou a realização de novas experiências posteriores (SOARES; SILVA, 2010).

Apesar destas iniciativas, com o passar dos anos tal combustível acabou sendo relegado em segundo plano, apenas como uma espécie de complemento às fontes tradicionais de petróleo e carvão, tidas como infinitas na época. Além disso, nos países com recursos de capital e energia limitados, como a China e a Índia, o biogás desempenhou um papel importante, fechando-se o primeiro ciclo da utilização do biogás como fonte energética (CAETANO, 1995).

A história do biogás continua com um segundo ciclo, o qual teve início em meados de 1940, no decorrer da II Guerra Mundial, quando a escassez e dificuldade de acesso às fontes fósseis de combustível reacenderam o interesse pela utilização do biogás, tanto para o cozimento e aquecimento de casas quanto a alimentação de motores de combustão interna. No entanto, após a guerra, o uso deste combustível ficou geograficamente remanescente na China e Índia, onde permanece sendo utilizado por pequenos produtores rurais até os dias de hoje. No entanto, a partir da crise energética dos anos 70, o gás metano dos digestores anaeróbios voltou a despertar o interesse geral conduzindo ao aumento de sua produção nos países europeus.

Já no Brasil, a história do biogás partiu da crise do petróleo na década de 70. Em 1979, foi construído um dos primeiros biodigestores do país. Assim, o projeto instalado na sede do governo foi importante, por demonstrar ser possível instalar uma unidade produtora de biogás com a utilização de materiais simples e de baixo custo, além disso, incentivou o governo para o contexto do Programa de Mobilização Energética (PME), a estimular a sua instalação em propriedades rurais. No entanto, problemas operacionais relacionados com a falta de informações e treinamento tor-

nando o sistema de baixa eficiência, fazendo com que muitos produtores rurais abandonassem a tecnologia. Assim, chegou ao fim o primeiro ciclo do biogás no Brasil.

Nos meados dos anos 2000, ocorreu o início do segundo ciclo, com o advento do mercado de créditos de carbono, que mobilizou recursos para a construção de biodigestores, em especial em propriedades rurais com criação de suínos de médio e grande porte. No contexto do mercado de créditos de carbono, os gases emitidos pelos dejetos dos animais, em geral em lagoas ou esterqueiras abertas, e não coletados, quando emitidos direto para atmosfera prejudica para o aumento do efeito estufa ou aumento da temperatura terrestre. Neste contexto, estima-se que, entre 2005 e 2013, foram instalados no Brasil cerca de 1000 biodigestores, considerando os incentivos financeiros dos créditos de carbono. Atualmente, o interesse maior está relacionado com sua capacidade de estabilização de resíduos, por conta da necessidade cada vez maior de preservação do meio ambiente (SEGHEZZO et al., 1998).

2.2.3 Processo de formação

Para Van Haandel (1994), a digestão anaeróbia é um processo em que algumas espécies de bactérias, ao atuar na ausência de oxigênio, atacam a estrutura de materiais orgânicos complexos para produzir compostos simples, tais como metano e dióxido de carbono, deixando na solução aquosa subprodutos como amônia, sulfetos e fosfatos, extraindo simultaneamente a energia e os compostos necessários para o seu próprio crescimento.

Os processos de digestão anaeróbica podem ser utilizados para o tratamento de qualquer material de origem orgânica. Atualmente, o tratamento de resíduos urbanos, agropecuários e de efluentes domésticos ou industriais representa a principal aplicação desses processos em escala que permite o aproveitamento do biogás produzido (ZANETTE, 2009).

A digestão anaeróbica da matéria orgânica possui quatro etapas básicas que estão envolvidas para o processo de formação do biogás: Hidrólise, fermentação (ou Acidogênese) e Metanogênese (Oxidação anaeróbica e Formação de metano). Sendo a primeira delas a hidrólise, esta etapa tem importância elevada para uma instalação de biogás, pois o material orgânico a ser digerido deve ser quebrado em

minúsculas moléculas para que os microrganismos consigam se alimentar por meio delas. As bactérias disponíveis no biodigestor também segregam enzimas que rompem as moléculas de proteína e as transformam em aminoácidos, hidratos de carbono em açúcares simples, alcoóis e graxas em ácidos graxos. As moléculas que quebram o material orgânico possibilitam que os microrganismos absorvam as pequenas partes do material e tirem proveito da energia que nelas estão contidas. A rapidez do processo depende do tipo de material e de como é estruturado. Para alguns efluentes industriais, a fermentação pode ser a primeira etapa no processo anaeróbico. O ponto de partida para uma aplicação em particular depende da natureza do resíduo a ser processado (ZANETTE, 2009).

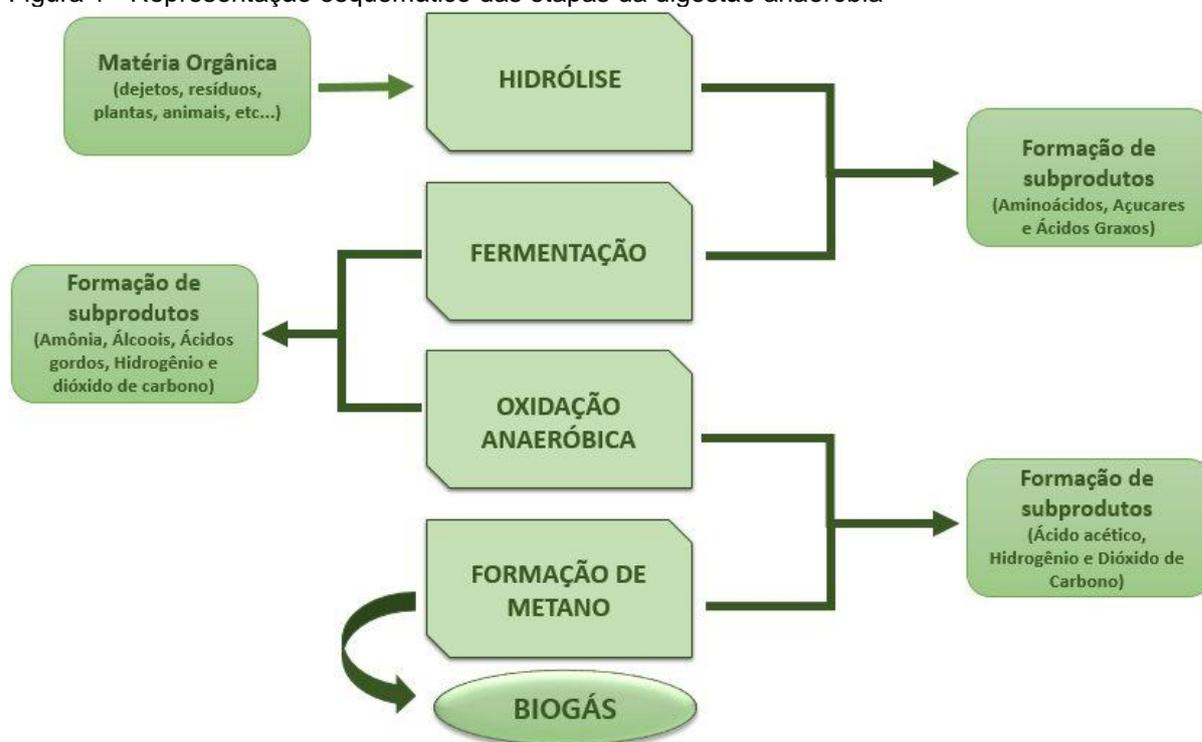
A segunda etapa do processo de digestão é a fermentação ou acidogênese. O que ocorre nesta etapa, depende do tipo de material orgânico que é adicionado ao processo de digestão anaeróbia, assim como dos microrganismos que estão disponíveis no sistema. Os componentes menores derivados da ruptura de moléculas grandes na hidrólise continuam a ser quebrados em moléculas sempre menores. No processo de fermentação, aminoácidos, açúcares e alguns ácidos graxos são degradados. Os substratos orgânicos servem tanto como doadores quanto aceptores de elétrons. Os principais produtos da fermentação são acetato, hidrogênio, CO_2 , propionato e butirato. O propionato e o butirato são fermentados posteriormente para também produzir hidrogênio, CO_2 e acetato. Os produtos da fermentação são, portanto, os precursores para a formação de metano na metanogênese. A energia livre associada com a conversão de propionato e butirato a acetato e hidrogênio requer que o hidrogênio esteja presente em baixas concentrações no sistema, ou a reação não ocorrerá (METCALF; EDDY, 2003).

A terceira etapa é a que antecede a formação de gás metano sendo chamada de Oxidação anaeróbia. Em tal etapa, as moléculas rompidas durante a fase de hidrólise e fermentação, são rompidas em moléculas ainda menores pela oxidação anaeróbia, sendo necessário que haja boa interação entre os microrganismos produtores de metano. A etapa é também conhecida como acetogênese. As bactérias acetogênicas convertem o material degradado em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Entretanto, como o ácido acético será convertido em metano, o impacto desta reação é pequeno (ZANETTE, 2009).

Na última etapa, conhecida como metanogênese, tem-se a fase de formação de metano. O metano é realizado por dois grupos de microrganismos chamados de metanógenos que necessitam, para sua formação, ácido acético e CO_2 e de mais alguns produtos de menor importância. Além disso, na fase metanogênica também obtém dióxido de carbono e água. Um grupo chamado de metanógenos acetilclásticos converte o acetato em metano e dióxido de carbono. O segundo grupo, denominado metanógenos utilizadores de hidrogênio, utiliza hidrogênio como doador de elétrons e o CO_2 como receptor de elétrons para produzir metano (ZANETTE, 2009).

A Figura 1 destaca uma representação esquemática das etapas do processo de digestão anaeróbia, ou seja, a conversão da matéria orgânica em gases.

Figura 1 - Representação esquemática das etapas da digestão anaeróbia



Fonte: Tommy Karlsson.

É importante adaptar o processo para que as bactérias metanogênicas possam sentir da melhor maneira possível, pois é o gás metano que gera rentabilidade. Para Chernicharo (2007), há vários fatores que podem afetar a eficiência da produção de biogás.

2.2.4 Purificação do biogás

Para aumentar o poder calorífico, rendimento térmico e eliminar a característica corrosiva devido à presença de gás sulfídrico e água, é preciso tratar e purificar o biogás produzido (ZANETTE, 2009).

Dependendo de qual for a aplicação do gás produzido, ele deverá passar processo de purificação com o objetivo de elevar o seu poder calorífico com a remoção da água e do gás carbônico presente na mistura. Além destes, pode estar presente na mistura gasosa o gás sulfídrico, que deverá ser removido, uma vez que pode afetar tanto o rendimento quanto a vida útil do motor utilizado por ser um gás altamente corrosivo (COELHO, 2006).

Outra vantagem é que o biogás purificado pode ser armazenado em torpedos de aço, a 200 atmosferas, para uso em veículos garantindo, assim, uma maior autonomia, além de apresentar um melhor rendimento quando usado em moto geradores (SOARES et al., 2010).

Dependendo de qual for o uso do biogás, será definido qual o grau de umidade aceitável, a retirada de água pode ser necessária por conta do potencial de acumulação condensado na linha de gás, a formação de uma solução ácida corrosiva quando é associado com o sulfeto de hidrogênio ou para atingir pontos de orvalho na estocagem sob pressões elevadas, ao passo que assim será realizada a sua secagem. Esse processo pode ser executado com a utilização de glicóis, com sílica gel ou outro produto que retenha umidade (CRAVEIRO, 1982).

A remoção do gás sulfídrico por óxido férrico consiste em passar a mistura gasosa por uma torre com preenchimento de óxido de ferro III (Fe_2O_3) e aparas de madeira. O gás é inserido pela base da torre e, conforme vai subindo por ela, vai perdendo o gás sulfídrico (H_2S) que fica retido ao reagir com o óxido de ferro, sendo esse processo mais econômico. Para regenerar o óxido de ferro, basta expor o enchimento ao ar (CRAVEIRO, 1982).

Alternativa quanto uso do óxido de ferro é substituí-lo por óxido de zinco (ZnO), porém o referido processo tem um valor monetário elevado. Estima-se que $1,0 \text{ m}^3$ de enchimento com óxido de ferro possa ser capaz de remover cerca de 100kg de enxofre (CRAVEIRO, 1982).

Outro meio de retirar o gás sulfídrico é realizar a lavagem do gás em lixívia de hidróxido de potássio (KOH) e utilizar o sal resultante como aditivo do biofertilizante para enriquecê-lo com enxofre e potássio (OLIVEIRA, 2005).

O CO₂ deve ser removido nos casos em que o biogás precisa atingir padrões do gás natural ou para uso em veículos, uma vez que sua remoção aumenta seu poder calorífico e resulta na elevação da autonomia do veículo para uma determinada capacidade de armazenamento (ZANETTE, 2009).

Para a que ocorra a remoção de gás carbônico, esse processo pode ser realizado de muitas maneiras. O gás pode ser lavado com água, sendo uma forma simples de remover as impurezas. No entanto, é um processo que consome uma quantidade elevada de água, sem contar que é muito dependente da temperatura e pressão (OLIVEIRA, 2005).

A Tabela 2 apresenta os principais requisitos para remoção de compostos gasosos conforme a utilização do biogás.

Tabela 2 - Necessidade de remoção de compostos gasosos conforme a utilização do biogás

Aplicação	H₂S	CO₂	H₂O
Caldeiras	<1000 ppm	Não	Não
Fogões	Sim	Não	Não
Cogeração	<1000 ppm	Não	Condensação do vapor
Combustível veicular	Sim	Recomendável	Sim
Rede de gás natural	Sim	Sim	Sim

Fonte: IEA (2005).

2.2.5 Poder calorífico

Um das características mais relevantes de um combustível são o seu poder calorífico, o qual representa a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do mesmo (kJ/kg).

É possível identificar a composição de um combustível, ou seja, constatar que ele é composto de carbono, hidrogênio e oxigênio. Quando ocorre a sua combustão, há formação de água como produto dessa reação devido à presença do hidrogênio. Caso a água formada na combustão se condense, obtêm-se um poder calorífico maior (poder calorífico superior), mas se a água estiver no estado gasoso o poder calorífico será menor (poder calorífico inferior) (OLIVEIRA, 2009).

Por causar tal fato, o metano apresenta um poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI). Em consequência disso, o biogás (mistura com grande quantidade de gás metano e gás carbônico) apresentará um poder calorífico superior e outro inferior como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades físicas e químicas do metano

Peso molecular	16,01 u.m.a
Ponto de ebulição, a 1 atm	-161,49 °C
Ponto de congelamento, a 1 atm	-182,48 °C
Pressão crítica	45,84 atm
Temperatura crítica	-82,50 °C
Peso específico (0°, 1 atm)	0,718 kg/m ³
Poder calorífico superior (0°, 1 atm)	9520,00 kcal/m ³
Poder calorífico inferior (0°, 1 atm)	8550,00 kcal/m ³
Relação ar/combustível	9,53 litros/1 litro
Limites de inflamabilidade	5,00 a 15,00% em vol.
Número de octanos	130,00
Temperatura de ignição	650,00 °C
Energia para ignição	300,00 µJ
Velocidade de chama	0,40 m/s

Fonte: Craveiro (1982).

Quanto à porcentagem de metano na composição da mistura gasosa (biogás), o poder calorífico pode variar de 5.000 a 7.000 kcal/m³. Uma vez retirado todo o gás carbônico da mistura, esse poder calorífico tem o potencial de aproximadamente 12.000 kcal/m³ (MAZZUCCHI, 1980).

Na Tabela 4, é possível observar o poder calorífico de alguns combustíveis.

Tabela 4 - Poder calorífico de alguns combustíveis

Combustível	Kcal
Madeira	4.500/kg
Briquetes de carvão	8.000/kg
Carvão vegetal	7.620/kg
Diesel	8.500/kg
Gasolina	7.700/kg
Querosene	8.800/kg
Álcool	5.100/litro ou 6.400/kg
Gasogênio	1.250/m ³
GLP (gás liquefeito de petróleo)	11.000/kg

Fonte: Gryscek; Belo (1983).

A Tabela 5 apresenta a comparação entre diferentes fontes energéticas e o biogás.

Tabela 5 - Comparação entre diferentes fontes energéticas e biogás

Biogás (m³)	Fonte energética	Equivalências
1,63	Gasolina	1 L
1,80	Óleo diesel	1 L
1,73	Querosene	1 L
1,58	Gasolina de avião	1 L
2,00	Óleo combustível	1 L
1,81	Petróleo médio	1 L
1,26	Álcool combustível	1 L
2,20	GLP	1 kg
0,65	Lenha	1 Kg
1,36	Carvão vegetal	1 kg
0,70	Energia elétrica	1 kWh

Fonte: Filho (1981).

O biogás terá um poder calorífico inferior entre 4.95 e 7.92kWh/m³, com base na porcentagem de metano presente na mistura, de 50 e 80%, respectivamente (MAZZUCCHI, 1980). Pode ser considerado o poder calorífico bruto do biogás pró-

ximo de 6 kWh/m³, sendo que, no caso do gás tratado, este valor eleva para 9.5 kWh/m³ (CENBIO, 2000).

Na Tabela 6, é evidenciada a equivalência energética do biogás comparada a outras fontes de energia.

Tabela 6 - Equivalência energética do biogás (1m³) comparada a outras fontes de energia

Energético	Sganzeria (1983)	Nogueira (1986)	Barrera (2003)
Gasolina (L)	0,61	0,61	0,61
Querosene (L)	0,58	0,62	0,58
Diesel (L)	0,55	0,55	0,55
GLP (kg)	0,45	0,43	0,45
Álcool (L)	0,79	0,80	0,79
Carvão mineral (kg)	0,74	0,74	-
Lenha (kg)	1,51	3,50	1,54
Eletricidade (kWh)	1,43	-	1,43

Fonte: Sganzeria (1983), Nogueira (1986), Barrera (2003).

2.2.6 Aplicações do biogás

Zanette (2009) salienta que o biogás pode ser utilizado em praticamente todas as aplicações desenvolvidas para o gás natural. Em algumas delas, entretanto, ele deve ser tratado. As aplicações mais comuns são o aquecimento e a geração de eletricidade, além da utilização como combustível veicular e da injeção na rede de gás natural, que vêm atraindo cada vez mais interesse. Nos países em desenvolvimento, o uso mais comum do biogás em plantas de pequena escala é para cocção e iluminação. Nos países industrializados, o gás é utilizado para produção de vapor em diversas aplicações industriais.

O gás produzido pode ser usado diretamente, purificado ou armazenado para posterior utilização. Existem diversas tecnologias capazes de efetuar a conversão energética do biogás. A energia química contida nas moléculas é convertida em energia mecânica por meio da combustão. Essa energia mecânica é, então, convertida em energia elétrica com a utilização de um gerador. No entanto, o biogás também pode ser usado na produção de calor, o qual pode ser utilizado no aquecimento de,

por exemplo, caldeiras para qualquer tipo de processo industrial. Por isso, atualmente, as turbinas a gás e os motores de combustão interna, ciclo Otto, são as tecnologias mais usadas para aproveitamento energético do biogás (OLIVEIRA, 2009).

O biogás tem o emprego como matéria-prima para a indústria, pois podem usar o metano para síntese de uma série de compostos orgânicos. Na atualidade, deve ser destacado o seu uso na obtenção de metanol. Como o biogás é composto por 30 a 45% de gás carbônico, o que deve ser feito é a remoção de parte desse gás por algum dos processos já mencionados ajustando, assim, a concentração para 22,6% (CRAVEIRO, 1982).

Pode-se empregar o biogás na produção de vapor, sendo esse o caso de indústrias que tratam seus resíduos por meio de processos de digestão anaeróbia e utilizam o biogás para geração de vapor nas caldeiras, ocasionando uma economia com o uso do óleo combustível, carvão ou lenha, pois, conforme a Tabela 6, pode-se quantificar a quantidade a ser substituída (BARRERA, 2003).

Quando a produção do biogás é grande, uma utilidade atrativa para o biogás é o uso como combustível veicular. Com isso, existe a necessidade de realizar o tratamento do biogás removendo-se tanto o gás carbônico quanto o gás sulfídrico. Para não ter vários problemas de corrosão interna ao motor, o gás sulfídrico deve ser retirado, e o gás carbônico deve ser retirado com o propósito de aumentar o poder calorífico do gás, com objetivo de manter nos tanques de armazenamento uma maior densidade de biogás com mais poder calorífico, o que corresponderá uma maior autonomia ao veículo (OLIVEIRA, 2009).

Com o emprego do biogás para geração de energia elétrica, a utilização de biogás em sistemas de combustão interna é uma tecnologia bem estabelecida e extremamente confiável. Milhares de equipamentos são operados em estações de tratamento de efluentes, aterros e plantas de biogás. O tamanho dos equipamentos varia de 12 kW em pequenas fazendas até vários MW em grandes aterros (IEA, 2005).

Uma aplicação promissora na geração de eletricidade é o uso de turbinas a gás. As turbinas a gás figuram como uma tecnologia bem constituída para potências superiores a 800 kW. Nos últimos anos, turbinas menores, também chamadas de microturbinas na faixa de 25 a 100 kW, têm sido introduzidas com êxito para o aproveitamento do biogás. Elas possuem eficiência comparável com a de motores pequenos com injeção por centelha com baixas emissões, permitindo também a

recuperação de vapor de baixa pressão, o que é interessante para aplicações industriais. Além disso, os custos de manutenção são muito baixos. As especificações para o gás são comparáveis com as dos sistemas de cogeração (US EPA, 2007).

O biogás pode ser injetado e distribuído na rede de gás natural, uma vez que, assim como este, é composto principalmente de metano. O uso da rede de gás natural para o transporte e distribuição do biogás apresenta diversas vantagens. Uma delas é que a rede conecta os locais de produção com as áreas mais populosas, o que permite que o gás alcance novos consumidores. Há também a possibilidade de aumentar a produção em locais remotos, aproveitando todo o gás produzido. Para a injeção na rede, porém, as especificações do gás natural devem ser atendidas, o que pode ser realizado com os processos de tratamento existentes (ZANETTE, 2009).

A Tabela 7 exibe o consumo de biogás em algumas aplicações.

Tabela 7 - Consumo de biogás por aplicação

Aplicação	Consumo
Motor a explosão	0,450 m ³ /HP/h
Iluminação	0,120 m ³ /camisa de 100.0 W/h
Cozimento de alimento	0,340 m ³ /pessoa/dia
Forno de assar alimento	0,40 m ³ /h
Aquecedor de ambiente	0,227 m ³ /h
Geladeira	1,3 m ³ /dia

Fonte: Filho (1981).

2.2.7 Sistemas de produção

Um dos sistemas de produção do biogás mais conhecido e utilizado é proveniente de processos de digestão anaeróbia, por intermédio de uma estrutura física construída, denominada de biodigestores (ZILOTTI, 2012).

O biodigestor é um sistema usado para a produção de biogás, cujo principal gás é o metano, produzido por bactérias que digerem matéria orgânica em condições anaeróbicas na degradação de polímeros orgânicos derivados de matéria biodegradável, como resíduos alimentícios, lodo de esgoto, lixo doméstico, esterco orgânico, substrato de cana-de-açúcar, efluentes industriais e demais resíduos agrí-

colas. Quando a digestão é realizada em biodigestores especialmente planejados, a mistura gasosa pode ser utilizada como combustível, o qual, além de não produzir gases tóxicos durante a queima e de ser ótima alternativa para aproveitamento do lixo orgânico, ainda deixa como resíduo um lodo que é um excelente biofertilizante (FRANÇA JÚNIOR, 2008).

Von Sperling (2016) destaca que os biodigestores são somente reatores, a partir dos quais ocorrem reações químicas com origem biológica, isto é, tem-se como produto principal o biogás. O biogás produzido e purificado, conforme necessidades, pode ser aproveitado para geração de energia elétrica e térmica. Vale frisar que a energia elétrica pode ser usada para o consumo interno e o calor para o aquecimento do próprio biodigestor.

Para França Junior (2008), existem vários tipos de biodigestores e cada um possuindo características próprias. Eles podem ter produção descontínua ou produção contínua. No caso do primeiro, a biomassa é depositada dentro do biodigestor, sendo totalmente fechado e somente aberto após aproximadamente noventa dias, quando o biogás está produzido. Com isso, é iniciado um novo ciclo de produção, limpo e novamente carregado. No entanto, a produção contínua pode acontecer por um longo período, sem que haja a necessidade de abertura do equipamento. A biomassa é colocada no biodigestor simultaneamente à retirada do biofertilizante.

Os biodigestores podem pertencer a dois tipos: de fluxo hidráulico descontínuo (biodigestor de batelada), ou de fluxo hidráulico contínuo. Neste último grupo, está a maioria dos biodigestores que são encontrados no Brasil, sendo que os mais comuns são o indiano, chinês, tubular e o UASB/RALF (CHERNICARO, 2001).

O biodigestor de campânula flutuante, também conhecido como Biodigestor Indiano, é composto por uma câmara de digestão e de um depósito de gás móvel, que é caracterizado por possuir uma campânula como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou em um selo d'água externo, e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. Este flutua diretamente sobre o lodo em digestão ou em um selo hídrico. O fato de o gasômetro estar disposto sobre o substrato ou sobre o selo d'água, reduz as perdas durante o processo de produção do gás (ZILOTTI, 2012).

O modelo indiano possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a se deslocar verticalmente, aumentando o seu volume. Com isso, a pressão é manti-

da em seu interior, sendo bastante constante. A função da parede divisória faz com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação. Tal modelo pode ser operado como um biodigestor contínuo com descarga automática, dispensando o tanque de compensação. Esses equipamentos possuem alto custo de construção, devido à necessidade da campânula, geralmente metálica, que entra em corrosão resultando uma vida útil curta, em torno de cinco anos. Com isso, o Biodigestor Indiano apresenta também altos custos de manutenção e tem a necessidade periódica de pintura da campânula. Foi um dos primeiros biodigestores de alimentação contínua a ser amplamente divulgado no ocidente. O modelo popularizou a produção de biogás, inclusive no Brasil (ZILOTTI, 2012). Para Barrera (2003), foi desenvolvido na Índia, a partir de 1937 e teve seu modelo mais conhecido, de cúpula móvel, lançado por Patel, em 1950.

O biodigestor modelo chinês é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria (tijolo) para a fermentação, com teto abobado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. Este biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que aumentos de pressão em seu interior resultantes do acúmulo de biogás resultarão em deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída e, em sentido contrário, quando ocorre descompressão.

O modelo Chinês é constituído quase que totalmente em alvenaria, dispensando o uso de gasômetro em chapa de aço, reduzindo os custos. Entretanto, podem ocorrer problemas com vazamento do biogás caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada. Neste tipo de biodigestor, uma parcela do gás formado na caixa de saída é libertada para a atmosfera, reduzindo parcialmente a pressão interna do gás. Por este motivo, as construções de biodigestor tipo chinês não são utilizadas para instalações de grande porte. Semelhante ao modelo Indiano, o substrato deverá ser fornecido continuamente, com a concentração de sólidos totais em torno de 8%, para evitar entupimentos do sistema de entrada e facilitar a circulação do material. Em termos comparativos, os modelos Chinês e Indiano possuem desempenho semelhante, porém o segundo, em determinados experimentos, pode ter sido ligeiramente mais eficiente quanto à produção de biogás e redução de sólidos no substrato, tal como é possível visualizar na Tabela 8 (LUCAS JÚNIOR, 1987).

Tabela 8 - Resultado preliminares do desempenho de biodigestores modelos Indiano e Chinês, com capacidade de 5,5 m³ de biomassa, operados com esterco bovino

Biodigestor		
	Chinês	Indiano
Redução de Sólidos (%)	37	38
Produção Média (m ³ /dia)	2,7	3
Produção média de substrato (kg/m ³)	489	538

Fonte: Lucas Júnior (1987).

Esse modelo foi desenvolvido na China, em 1936. É o biodigestor rural de maior sucesso no mundo, até hoje. Só na China, foram construídos mais de 8 milhões de unidades. Por não usar cúpula móvel, pode ser construído inteiramente de alvenaria e, por isso, tem baixo custo e pouca manutenção (BARRERA, 2003).

O biodigestor tubular é o modelo de biodigestor mais usado no momento, principalmente no manejo de suínos, e o tubular com manta plástica. Conhecido também como biodigestor canadense ou plug-flow, esse modelo é comprido, horizontal e em seção transversal trapezoidal. A relação mais aplicada entre a altura e o comprimento do biodigestor é 1:5. O sistema é escavado no solo e revestido no fundo por manta plástica, que deve ser rígida (Poliestireno de Alta Densidade – PEAD). É possível ainda um revestimento em alvenaria, que deve ser totalmente impermeável para que não ocorram infiltrações e escapes de gás.

Na superfície, constrói-se uma canaleta de concreto em torno do biodigestor, que atua como selo de água e para fixação da manta plástica flexível que figura como gasômetro. Com uma grande área de exposição ao sol, esse biodigestor possibilita uma maior produção de biogás que os outros modelos comumente usados. A temperatura é um dos fatores que mais afeta a produção do biogás. Na faixa de temperatura entre 20 e 45°C, estão concentradas as bactérias do tipo mesófilas que promovem a metabolização dos dejetos resultando em biogás. Para que o aproveitamento da temperatura seja total, recomenda-se a utilização de manta plástica negra. Durante a produção do biogás, a manta plástica infla, indicando a quantidade de gás produzido, podendo então ser retirado.

No inverno, a temperatura baixa diminui a ação das bactérias na produção do biogás. Uma alternativa para aumentar o desempenho do processo é a utilização de inóculo no biodigestor. O inóculo acelera a produção do gás e é composto pelo mesmo tipo de dejetos digeridos anteriormente ao processo, contendo micro-

organismos típicos da digestão anaeróbica capazes de fermentar o material em pouco tempo (DELGROSSI BARROS, 2008).

O biodigestor tubular, segundo Feiden (2004), foi utilizado pela primeira vez na África do Sul, em 1957, com um ótimo resultado, quando despertou muito interesse por sua boa produção de biogás em baixo tempo de retenção hidráulica. Muito difundido nos EUA após o choque do petróleo, foi o biodigestor com maior registro de ocorrências na história. Em geral, é implantado sem qualquer cuidado com seu modelo hidráulico básico e sem cuidados em atender suas exigências de ausência de agitação longitudinal (ZILOTTI, 2012).

Os biodigestores modelos RALF/UASB são Reatores Anaeróbios de Leito Fluidizado (RALF), também conhecido como *Up Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors* (UASB). São muito utilizados para tratamento de efluentes, de maneira biológica, baseado no processo de estabilização de matéria orgânica (ZILOTTI, 2012).

O funcionamento do RALF consiste, inicialmente, em conduzir o esgoto bruto para um gradeamento fino, a fim de remover os sólidos flutuantes, em suspensão, e a um desarenador para remover sólidos sedimentáveis prejudiciais ao processo. Após o esgoto estar gradeado e desarenado, é conduzido até uma câmara no centro superior do reator, quando é dividido em partes iguais para alimentar tubos difusores que conduzem o esgoto até o fundo dele. Na parte inferior do reator, o esgoto em fluxo ascendente é misturado com o lodo contido em um manto previamente formado ou inoculado, rico em bactérias anaeróbias. A matéria orgânica contida no esgoto fica retida nesse manto de lodo e é degradada e estabilizada por meio da atividade metabólica das bactérias (ANDRADE NETO, 1997).

As bactérias presentes no manto de lodo transformam a matéria orgânica suspensa em produtos estáveis, como água, biogás e outros elementos inertes. Na parte superior do reator, existe uma parede defletora, que serve de interface da zona de digestão e de decantação. Os gases formados concentram-se na parte superior interna do reator de onde, por meio de um tubo, podem ser descartados ou reaproveitados para fins energéticos. A parte sólida arrastada pelos gases retorna ao manto de lodo após o desprendimento das bolhas geradas. O líquido segue para o decantador periférico e é vertido para uma canaleta que coleta todo o efluente tratado e o conduz para o emissário. Esse emissário pode conduzir o efluente para um corpo receptor ou para um pós-tratamento. O lodo excedente gerado no reator deve

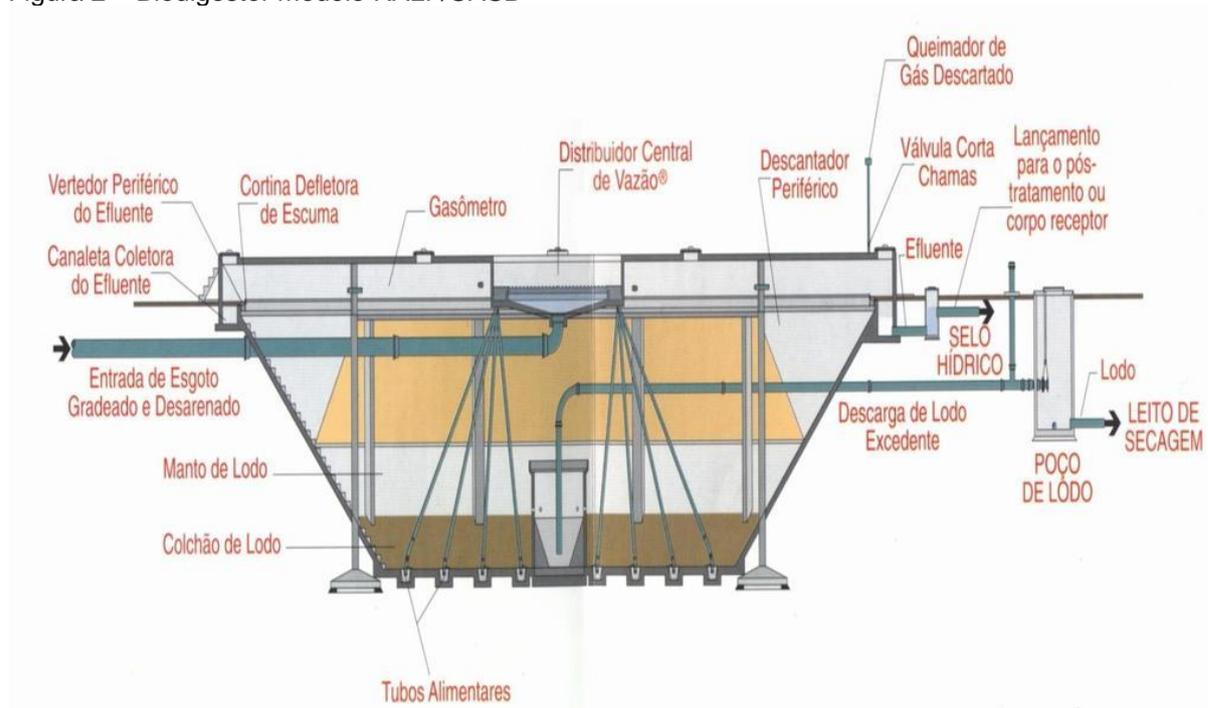
ser removido periodicamente para leitos de secagem e aterros sanitários (ANDRADE NETO, 1997).

Sendo a unidade fechada, o biogás produzido pode ser acumulado em um gasômetro, permitindo o aproveitamento do elevado potencial energético representado pelo gás metano (FRANÇA JÚNIOR, 2008).

Os reatores do tipo RALF/UASB apresentam desempenho de remoção de DQO entre 50 a 70%, remoção de DBO de 60 a 85%, remoção de SST de 60 a 85% e remoção de patogênicos de 85% (BARÉA, 2006).

A Figura 2 mostra uma representação esquemática de um reator RALF empregado na Sanepar.

Figura 2 – Biodigestor modelo RALF/UASB



Fonte: Baréa (2006).

2.2.8 Aspectos econômicos e ambientais

Em uma Estação de Tratamento de Esgoto, consome-se energia nas diversas etapas da execução das operações, utilizando energia nos equipamentos elétricos, para o bombeamento, aeração e no transporte de lodo para recirculação (ZILOTTI, 2012).

Para Coelho et al. (2003), o primeiro fator econômico a ser analisado é o uso de um gás combustível de baixo custo (biogás), para a geração de energia elétrica, uma vez que esse biogás é um subproduto de um processo de digestão anaeróbia e que, normalmente, é desprezado nas ETE's e queimado em "flare" para minimizar o impacto ambiental ou emitido diretamente no ar livre, contribuindo para o aumento do efeito estufa. Este pode ter um fim mais nobre, podendo ser utilizado como combustível, contribuindo sensivelmente com a diminuição de eletricidade em ETE's, otimizando o uso dos recursos naturais.

O aproveitamento energético do biogás, além de colaborar com a preservação do meio ambiente, traz benefícios para a sociedade, pois promove a utilização ou reaproveitamento de recursos "descartáveis" e/ou de baixo custo; colabora com a não dependência da fonte de energia fóssil, oferecendo maior variedade de combustíveis; possibilita a geração descentralizada de energia; aumenta a oferta de energia; favorece a geração local de empregos; reduz os odores e as toxinas do ar; diminui a emissão de poluentes pela substituição de combustíveis fósseis; colabora para a viabilidade econômica dos aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes; otimiza a utilização local de recursos; e aumenta a viabilidade do saneamento básico no país, permitindo o desenvolvimento tecnológico de empresas de saneamento e energéticas (PECORA, 2006).

2.2.9 Geração de energia elétrica

O potencial energético do biogás varia de acordo com a presença do metano em sua composição, ou seja, quanto mais metano, mais rico é o biogás. Quando originário de aterros sanitários, a proporção de metano é, em média, de 50%. Quando é gerada em reatores anaeróbios de efluentes a concentração média é mais elevada, atingindo até cerca de 70% (COSTA, 2006).

A quantidade de energia disponível durante a combustão por unidade de massa ou volume de um combustível é definida como poder calorífico. A densidade relativa do biogás é a relação de seu peso específico e o peso específico do ar. O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura, podendo atingir 5.000 a 6.000 kcal/m³, mas chegando a valores de 12.000 kcal/m³ quando melhorado com a retirada do CO₂ (ZAGO, 2003).

A Tabela 9 tem semelhanças com a Tabela 6, bem como evidencia a comparação entre o biogás e a respectiva equivalência entre os principais combustíveis usados como fonte energética.

Tabela 9 - Necessidade de remoção de compostos gasosos conforme a utilização do biogás

Combustíveis	1m³ de biogás equivale a
Gasolina	0,613 litros
Querosene	0,579 litros
Óleo diesel	0,553 litros
Gás de cozinha (GLP)	0,454 litros
Lenha	1,536 Kg
Álcool hidratado	0,790 litros
Eletricidade	1,428 kWh

Fonte: Barrera (2003).

Em termos de aproveitamento do biogás para a geração de energia, o tamanho da ETE é de fundamental importância. Para que a produção de biogás seja regular ao longo de 24 horas, a ETE deverá atender uma população mínima de 10 mil habitantes, com capacidade de geração de 5.544 kWh/mês (FRANÇA JUNIOR, 2008).

2.2.10 Motor a gás ciclo Otto

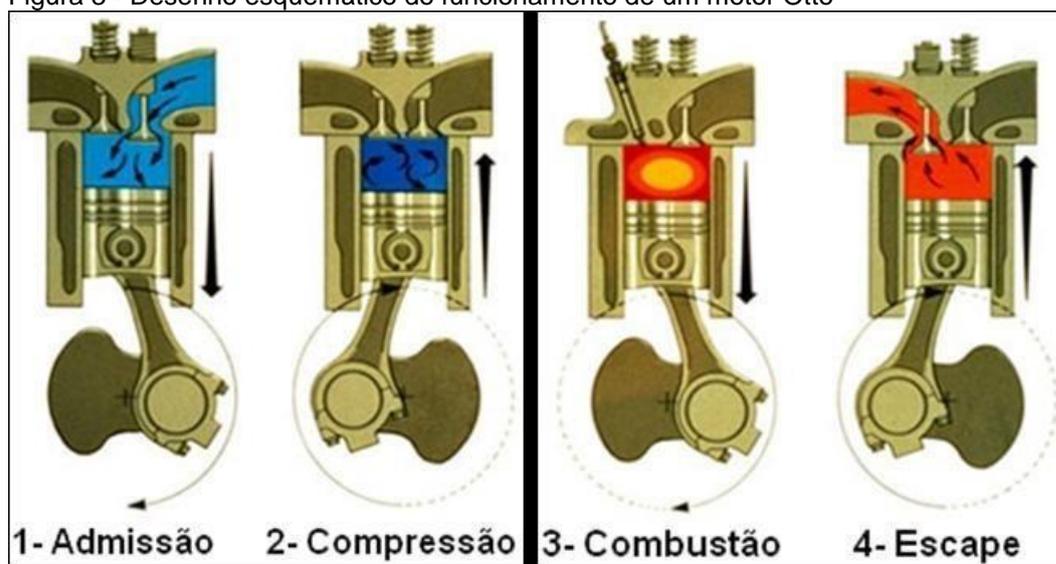
A tecnologia na geração da eletricidade na exploração do biogás, é a modificação da energia química, contida em suas moléculas para energia mecânica por uma forma de combustão controlada, como dentro de um motor de combustão interna e, por sua vez, a potência mecânica aciona um gerador que a transforma em energia elétrica. Para tal uso, o mais comum do biogás explorado em ETE é para gerar eletricidade, precisamente com motor de combustão interna do tipo “Ciclo Otto”. Eis a forma tecnológica mais usual para esse tipo de obtenção energética (COELHO et al., 2003)

O motor a combustão interna é uma máquina que modifica a energia derivada de uma reação química em energia mecânica, o procedimento de transformação se dá por meio de ciclos termodinâmicos que envolvem expansão, compressão e mu-

dança de temperatura de gases. Consideramos como sendo aqueles que usam os gases da combustão como fluido de trabalho, ou seja, são estes gases que fazem os procedimentos de compressão, aumento de temperatura (queima), expansão e, finalmente, exaustão.

Motor de combustão interna também é popularmente chamado de motor à explosão. Assim, o que acontece dentro das câmaras de combustão é a queima dos gases, que impulsiona os pistões e provoca o aumento da pressão interna da câmara, decorrente da combustão (queima controlada). Chama-se de explosão uma detonação dos gases, que deve ser evitada nos motores de combustão interna, a fim de proporcionar mais durabilidade e menores taxas de emissão de poluentes atmosféricos.

Figura 3 - Desenho esquemático do funcionamento de um motor Otto



Fonte: Otto (2011).

Ainda que variem levemente, conforme o fabricante, os requisitos para a utilização de biogás como combustível em motores a gás são basicamente muito semelhantes. Por isso, a temperatura máxima do biogás não deve exceder 40 °C, para não depreciar a vida útil dos componentes da linha de controle, regulagem de gás e não afetar a temperatura da mistura de ar e gás e, por conseguinte, o desempenho do motor (BELL, 2011).

A eficiência térmica deste tipo de ciclo depende somente da razão de compressão existente, sendo a razão de compressão a relação entre o maior e o menor

volume interno do cilindro. Esta razão, se aumentada, possibilita uma velocidade de chama maior por conta da pressão e a temperatura da mistura estarem mais elevadas na ignição. Com uma temperatura e pressão da mistura mais elevadas, a energia necessária para a ignição pode ser mais baixa, isso permite um início de combustão mais rápido e fácil. Assim, a velocidade da frente de chama se eleva, ocasionando uma velocidade de combustão também elevada, assim como o aumento da razão de compressão gera mais turbulência na mistura, o que favorece a combustão (MARTINS, 2011).

O biogás usado como combustível em motores possui um conteúdo energético muito similar ao gás natural, que atualmente possui grande utilização em motores (SUZUKI et al., 2011). A principal característica do biogás, que possui influência direta no desempenho de um motor, é o poder calorífico, sendo que este é função do percentual de CH_4 , da temperatura e da pressão absoluta. Outro item que deve ser considerado na utilização de biogás em motores é a velocidade de combustão, que é função do percentual do componente inflamável, no caso CH_4 . A maior velocidade de combustão é identificada próxima a relação A/C para combustão ideal, o que contribui para o aumento rápido da temperatura e pressão (MIHIC, 2004).

Os motores de ciclo Otto podem ser facilmente modificados para utilizar biogás, pois este tipo de motor é projetado para utilizar uma mistura de ar e de combustível com ignição por faísca. A principal modificação está no fornecimento de ar e no processo de mistura do ar ao biogás, substituindo o carburador de um motor que utiliza combustível em estado líquido. Assim, o motor é controlado por meio da quantidade de biogás que o abastece. Para otimizar este tipo de sistema, é desejável um aumento na razão de compressão, o que possibilita um menor consumo de combustível e uma maior potência. De qualquer forma, a transformação de um motor Otto operado a gasolina para biogás terá como consequência uma produção de energia inferior do que quando operado a gasolina. Isso ocorre porque, ao deixar de utilizar gasolina para usar biogás, a eficiência volumétrica do sistema é reduzida. Essa redução ocorre em razão da prevalência de um mesmo volume de mistura, pois um combustível líquido possui mais energia que a mistura de combustível gasoso. Além de todas as características citadas, o biogás possui uma velocidade de combustão mais lenta que a gasolina e o álcool, mas é possível ajustar o sistema de ignição para trabalhar nesta condição (MIHIC, 2004).

A potência e o controle de velocidade de motores a biogás são realizados por meio da variação da vazão de abastecimento da mistura A/C por uma válvula do tipo borboleta. Quando esta válvula está fechada há uma menor quantidade de mistura A/C, reduzindo a potência e a eficiência do motor (SUZUKI et al., 2011).

2.3 Matriz Energética

A matriz energética representa o conjunto de fontes de energia disponíveis no país para suprir sua demanda energética. A matriz energética brasileira é bastante diversificada, sendo composta por fontes renováveis e não renováveis de energia.

2.3.1 Matriz Energética Brasileira

O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo industrializado. Aproximadamente 43% da produção de energia no país é proveniente de fontes de energia renováveis, sendo elas a energia eólica, hidráulica, solar e biomassa (responsável pela produção de biocombustíveis, como o etanol) (EPE, 2019).

Apesar da significativa representatividade das fontes renováveis na matriz energética brasileira, o consumo de fontes de energias não renováveis no país ainda é maior que o de renováveis.

O petróleo é bastante utilizado no país para obtenção de energia. Segundo a Agência Internacional de Energia, o Brasil consumiu, no ano de 2017, cerca de 3,16 milhões de barris de petróleo por dia. Nesse mesmo ano, a produção de petróleo alcançou a marca de 2,80 milhões de barris diários.

Para o Ministério de Minas e Energia, obstáculos de ordem econômica e operacional impedem a difusão do uso de fontes renováveis de energia no país. É preciso investimento tecnológico que viabilize o uso dessas fontes para que elas cheguem até a maioria da população sem altos custos.

2.3.2 Matriz elétrica

Há uma diferença entre matriz energética e matriz elétrica. A matriz energética compreende as fontes de energia disponíveis no país para obtenção e suprimento da demanda de energia. Já a matriz elétrica representa o conjunto de fontes de energia utilizadas, especificamente, para produção de energia elétrica. Portanto, a matriz elétrica faz parte da matriz energética.

É quase impossível imaginar o planeta sem energia. Afinal, esse bem essencial atende diversas demandas da sociedade. Pela primeira vez na história, a população mundial sem acesso à eletricidade caiu para menos de um bilhão, como destaca o relatório World Energy Outlook 2018. Fato que demonstra o crescimento do setor.

A matriz elétrica de um país é responsável exclusivamente pela geração de energia e, atualmente, o Brasil possui 7.439 empreendimentos de energia em operação, totalizando 165.462.927 kW de potência instalada. Neste cenário, as fontes limpas e renováveis somam 80% do total, o que coloca o país como detentor de uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo (EPE, 2019).

A hidroeletricidade lidera com 63,9% (104,5 GW), seguido da energia eólica com 15,1 GW (9,2%), biomassa com 14,8 GW (9%), gás natural com 13,4 GW (8,1%), petróleo com 9,9 GW (5,4%), carvão mineral com 3,3 GW (2%), solar com 2,1 GW (1,3%) e nuclear com 2 GW (1,2%) (ANEEL, 2019).

No entanto, levando em conta que mais de 60% de energia é produzida por hidrelétricas, o crescimento das outras fontes é positivo e continua necessário, já que a água é um recurso natural finito, ao contrário dos ventos e do sol, por exemplo, que são fontes renováveis e ilimitadas (EPE, 2019).

Todo esse caminho já está sendo bem pavimentado por uma união de setores diversos e fortes estratégias, que confirmam um futuro mais sustentável. De acordo com relatório de 2018 da Agência Internacional de Energia (AIE) sobre as perspectivas energéticas globais a longo prazo, em 2040, a matriz elétrica nacional será composta por 96% de energias baixo carbono.

2.3.3 Geração Distribuída (GD)

Geração distribuída é a energia elétrica produzida no local de consumo ou próximo a ele, desde que siga algumas regras quanto à capacidade instalada e eficiência energética, também pode ser definida como uma fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição. A GD é válida para diversas fontes de energia sustentáveis como a energia solar, eólica e provenientes de usinas hidroelétricas.

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e, inclusive, fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se do micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade (ANEEL, 2018).

Os estímulos à geração distribuída são justificados pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Entre eles, estão o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2018).

Com o objetivo de reduzir os custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração; compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa nº 414/2010); aumentar o público-alvo; e melhorar as informações na fatura, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015 revisando a Resolução Normativa nº 482/2012.

Em conformidade com as novas regras que começaram a valer em 1º de março de 2016, é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2018).

Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. De acordo com as novas re-

gras, o prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses, sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos foi denominado “autoconsumo remoto” (ANEEL, 2018).

Compete ao consumidor a iniciativa de instalação de micro ou minigeração distribuída – a ANEEL não estabelece o custo dos geradores e tampouco eventuais condições de financiamento. Portanto, o consumidor deve analisar a relação custo/benefício para instalação dos geradores, com base em diversas variáveis: tipo da fonte de energia (painéis solares, turbinas eólicas, geradores a biomassa etc), tecnologia dos equipamentos, porte da unidade consumidora e da central geradora, localização (rural ou urbana), valor da tarifa a qual a unidade consumidora está submetida, condições de pagamento/financiamento do projeto e existência de outras unidades consumidoras que possam usufruir dos créditos do sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2018).

Por fim, é importante ressaltar que, para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão (grupo B), ainda que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será devido o pagamento referente ao custo de disponibilidade – valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) ou 100 kWh (trifásico). Já para os consumidores conectados em alta tensão (grupo A), a parcela de energia da fatura poderá ser zerada (caso a quantidade de energia injetada ao longo do mês seja maior ou igual à quantidade de energia consumida), sendo que a parcela da fatura correspondente à demanda contratada será faturada normalmente (ANEEL, 2018).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Produção média de esgoto por habitantes no Brasil

Um habitante consome em média 200 Litros de água por dia, sendo que 80% se torna esgoto, ou seja, tem-se uma taxa de produção de esgoto de 160 litro/dia por habitante, segundo a ABNT NBR 7229 (1993), DZ 215-R4 (2007) e FRANÇA JR (2008).

No ano de 2018, a média de consumo per capita de água no Brasil foi de 154.9 Litros de água por habitante ao dia (SNIS, 2018). Ponderando-se que 80% se torna esgoto, acontece uma produção equivalente de 123.92 litros por habitante ao dia de esgoto (BRASIL, 2016).

No estado do Paraná, no ano 2018, o total de habitantes atendidos com o fornecimento de água foi de 9.965.721 habitantes gerou um consumo de 186.04 litros por habitante ao dia e para o esgoto coletado atingindo 129.73 litros por habitantes ao dia. Tem-se um percentual de conversão de esgoto de 69.73% (SNIS, 2018).

Neste estudo, foram constituídas escalas de ETEs, assumindo que elas sejam estações de tratamento de esgotos com reatores UASB. Equivale a uma estação de tratamento para 1.000.000 de habitantes necessita de 20 reatores tipo UASB (FRANÇA JUNIOR, 2008). Tais escalas foram estabelecidas em função da população atendida como baixo, médio e alto concentração. Com base nesta escala, foi definido entre as cidades do Paraná, uma cidade para cada patamar, as quais foram utilizadas para realização das estimativas de potencial e avaliação econômica neste estudo.

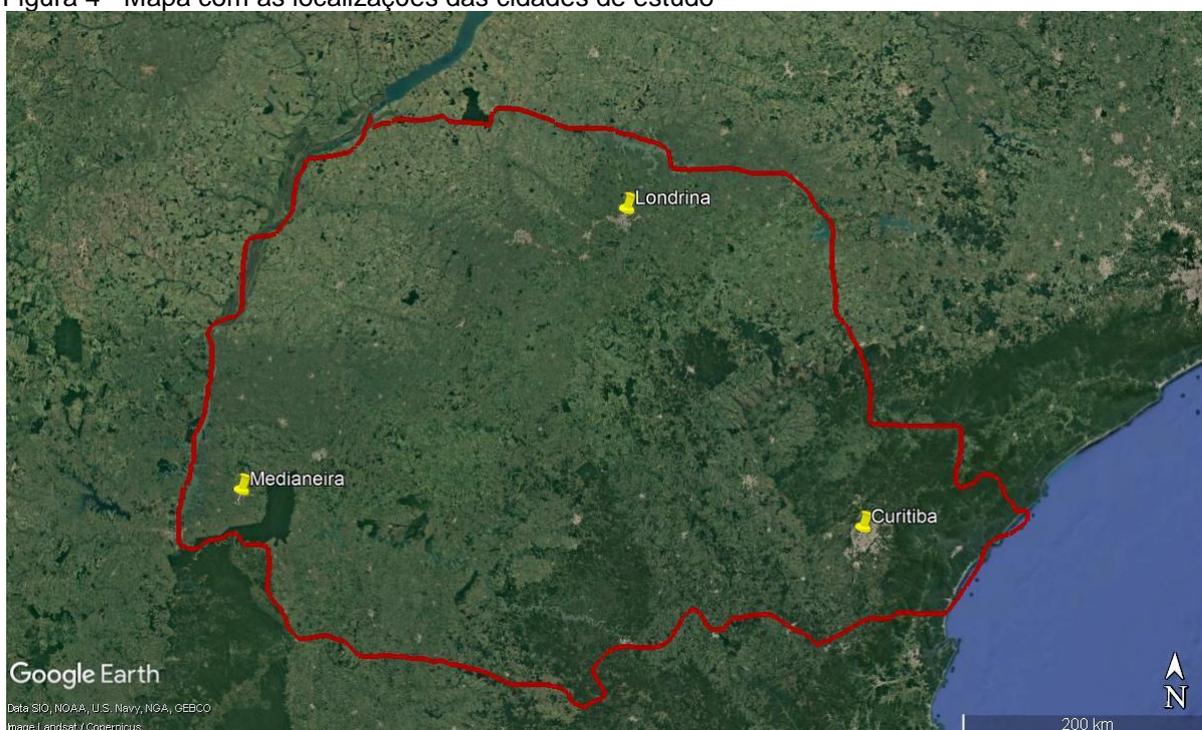
Para a baixa escala foi definido a cidade de Medianeira, a cidade de Londrina com a média escala e a cidade de Curitiba a de alta escala. Para este estudo, adotou-se um índice de produção de esgoto, conforme dados levantados no relatório (SNIS, 2018) correspondente à população atendida com esgotamento sanitário em cada cidade do estudo para estimar a produção de biogás, sendo elas listadas na Tabela 10 e demonstradas no mapa da Figura 4 as suas localizações.

Tabela 10 - Lista de cidades do Paraná para o estudo e volume de esgoto coletado

Escala	Cidades	População total atendida com esgotamento sanitário	Volume de esgoto coletado (1000m ³ /ano)	Volume de esgoto coletado (L/hab.dia)
Baixa	Medianeira	14.981	827,7	151,37
Média	Londrina	563.832	31.696,63	154,02
Alta	Curitiba	1.916.994	102.513,55	146,37

Fonte: Elaborado pelo autor (2020); SNIS (2018).

Figura 4 - Mapa com as localizações das cidades de estudo



Fonte: Google Earth.

3.2 Carga Orgânica de esgoto afluente de ETEs e eficiência de remoção

O sistema de tratamento de esgoto com o reator tipo UASB, tem a demanda química de oxigênio (DQO) de esgoto afluente e a eficiência de remoção de DQO no tratamento demonstrados na Tabela 11.

Tendo como parâmetros, conforme a Tabela 11, que a DQO de esgoto varia de 714 a 335 mg/L, e que este valor tem essa diferença em função do tipo de esgoto, ou seja, esgotos com percentual maior derivam de esgoto industrial tendo uma concentração maior de DQO. Portanto, obteve-se uma média de 521.63 mg/L de

DQO no afluente, e a eficiência de remoção de DQO, obteve-se uma média 75,33%, com base nos dados apresentados pelos autores referenciados na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados de DQO e eficiência de remoção de DQO em reatores tipo UASB

Referências	DQO afluente (mg/L)	Eficiência de remoção de DQO (%)
Tachini et. al (2002)	481,7	66
Lopes (2015)	631,8	77
Metcalf & Eddy (2003)	491,3	80
Oliveira (2006)	714,0	77
Zilotti (2012)	572,9	84
Matsuura et al. (2015)	335	83
Khan et al. (2011)	503	70
Haandel (1994)	563	67
Lettinga (1991)	402	74

Fonte: Khan et al (2011).

3.3 Cálculos de produção de biogás

É preciso determinar o potencial de produção de biogás de um reator UASB, que está baseado na demanda química de oxigênio (DQO), transformado pelo reator e sua conversão em metano (CH₄) denominada de DQO_{CH₄}. Para tanto, utilizou-se a Equação (1), (CHERNICHARO, 2007).

$$DQO_{CH_4} = Q \cdot (S_0 - S) - Y_{abs} \cdot Q \cdot S_0 \quad (1)$$

Onde:

Q Vazão do esgoto afluente (m³/dia);

S₀ DQO afluente (kg DQO/ m³);

S DQO efluente (kg DQO/ m³);

Y_{abs} Coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO ((0,11 a 0,23) kg DQO_{lodo}/DQO_{aplicada});

Para obter o valor de S, usa a equação 2 que está em função da eficiência da remoção do reator (E).

$$S = (1 - E) \cdot S_0 \quad (2)$$

A equação 1 destaca uma parte que representa como a demanda química de oxigênio é absorvida na síntese celular e promove o aumento da biomassa, sendo apresentada pela equação 3.

$$DQO_{abs} = Y_{abs} \cdot Q \cdot S_0 \quad (3)$$

A partir dos resultados obtidos acerca das variáveis, é possível dar continuidade para calcular a conversão da massa do metano em volume de metano produzido, representando pela equação 4 e 5, sugerida em Chernicharo (2015)

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (4)$$

Sendo:

Q_{CH_4} Produção volumétrica de metano (m³/dia);

$K(t)$ Fator de correção para a temperatura operacional do reator (kg DQO/ m³);
onde K(t) é representado pela Equação 5.

$$K(t) = \frac{P \cdot k}{R \cdot (273 + t)} \quad (5)$$

Sendo:

P Pressão atmosférica (1 atm);

k DQO correspondente a 1 mol de CH₄ (64 gDQO/mol);

R Constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.K);

t Temperatura operacional do reator (°C);

3.4 Estimativas do potencial de geração de eletricidade

A Equação 6 determina a potência elétrica de geração em função da produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto.

$$PT_E = P_B \cdot \eta_E \cdot PCI \quad (6)$$

Sendo:

PT_E Potência de geração de eletricidade (kW);

P_B Quantidade média de biogás captada na estação de tratamento (m³/h);

PCI Poder calorífico do biogás (kWh/m³);

η_E Eficiência de conversão de biogás em energia elétrica (0-1.0);

Levando em conta o uso de motores geradores e a combustão interna para o potencial de geração de energia elétrica, estabelecendo-se cenários com diferentes eficiências de conversão, a eficiência de geração de eletricidade utilizada foi referente aos motores geradores, sendo considerado 20% e 30% da eficiência para motores fabricados no Brasil (PIPATMANOMAI et al., 2009).

O valor do poder calorífico do biogás pode ser obtido com a porcentagem de concentração do metano na mistura, sendo que essa pode variar de 50 a 80% (DELAZARE, 2004; OLIVEIRA, 2009). O Poder calorífico inferior do biogás é de 6,5 kWh/m³, para uma concentração do metano de 65% na mistura. No biogás purificado (biometano), pode chegar no valor de 9,5 kWh/m³ (OLIVEIRA, 2009).

3.5 Cálculos de viabilidade econômica

Para a verificação da viabilidade econômica da implementação do sistema de motores geradores, foi utilizado o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), aspectos calculados por meio da equação 7 e 8. Inicialmente, foi estruturado o fluxo de caixa, ou seja, o somatório de todos os custos e receitas em cada período. Em seguida, foi descontado o valor anual pela taxa mínima de

atratividade (TMA), sendo o somatório destes valores anuais descontados iguais ao valor presente líquido (CASAROTTO FILHO et al., 1994).

O VPL é a diferença entre o valor investido e o valor resgatado ao fim do investimento, trazidos ao valor presente. Se o VPL for positivo, então, o valor investido será recuperado e haverá um ganho. Se o VPL for zero, significa que aplicar não fará diferença. Agora, caso o VPL seja negativo significa que o investido resgatará um valor menor, então, não se deve aplicar neste investimento (CASAROTTO FILHO et al., 1994).

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (7)$$

Onde:

VPL Valor presente líquido;

*I*₀ Investimento inicial na planta;

*FC*_{*t*} Fluxo de caixa no período;

i Taxa de juros em %a.m.;

η Número de períodos (mês);

A TIR é a taxa que relaciona o valor investido com valor resgatado ao fim do investimento. Ou seja, a taxa necessária para que o VLP seja igual a zero (CASAROTTO et al., 1994).

$$TIR = i^* \rightarrow VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i^*)^t} = 0 \quad (8)$$

Por meio do ganho com a compensação da energia, atendendo à NR 482/2012 de ANEEL, foi possível obter o payback e taxa interna de retorno, pois estes dois parâmetros são obtidos quando o VPL é nulo.

Para efeito de cálculo do custo de geração de eletricidade, foram estabelecidos parâmetros econômicos. Sendo assim, um dos dados é o custo do sistema de geração de eletricidade, com a participação de valores de custo da Empresa Biogás Motores Estacionários LTDA. Com isso, foi constituída uma linha de tendência que tem como função o tamanho de geração da planta, ver Tabela 12.

O custo específico da geração de eletricidade a biogás foi assumido levando em conta a variação com a escala da planta de geração, visto que tais valores foram obtidos por meio de contato com a Empresa Biogás Motores Estacionário LTDA. Com os valores de custo específico, então, obteve-se uma equação para a curva de custo específico *versus* capacidade da planta, conforme Tabela 12.

O cálculo do valor presente líquido (VPL) e o tempo (n) foram estabelecidos em meses. Vale frisar que o retorno do investimento deveria ocorrer no período de um ano.

Tabela 12 - Parâmetros econômicos utilizados para os cálculos do custo de geração de eletricidade

Parâmetro	Valores
Custo específico da planta de geração de eletricidade (R\$/kW)	$y = 700 + 2002,6 \cdot x^{-0.106}$
Taxa de desconto (d) (%)	1
Tempo (n) (meses)	240
Taxa de operação e manutenção (%/ano)	4

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A redução do custo específico com variação em escala ocorre quando a empresa consegue diminuir o custo médio de produção. Assim, à medida que aumenta a quantidade de produtos, ela está colocando em prática a economia de escala. Isso representa uma vantagem, especialmente para startups que podem aumentar sua produção e ampliar seu espaço de mercado rapidamente.

É importante salientar que o custo de investimento da planta será composto com o motor gerador, painéis elétricos e sistema de conexão da planta com a rede

da concessionária. Não se considerou o investimento no sistema de produção de biogás, pois foi tido como disponível nas estações de tratamento de esgoto.

Para efeito de cálculo do VPL de aproveitamento de biogás para geração própria de energia, adotou-se a tarifa da Resolução ANEEL nº 2.559 de 18 de junho de 2019, correspondente à tarifa horo-sazonal verde, subgrupo A4, a qual é cobrada pela COPEL (Companhia de Energia Elétrica do Paraná), cujos valores são de 1,28701 R\$/kWh na ponta e 0,33929 R\$/kWh fora de ponta. Com isso, foi possível estabelecer um ganho monetário pela ETE ao evitar comprar energia da CE (Companhia Energética). Vale frisar que o referido ganho foi considerado porque a ETE é uma taxa mensal no horário de ponta (3 horas por dia) e horário fora de ponta (21 horas por dia).

3.6 Levelized Cost of Energy (LCOE)

Os analistas criaram, há décadas, uma abordagem que tenta integrar algumas das principais variáveis de custo das tecnologias de geração. Ela é chamada de “Levelized Cost of Energy” (LCOE) em inglês, ou “Custo Nivelado de Energia”. É uma medida usada para avaliar e comparar métodos alternativos de produção de energia. O LCOE de um ativo gerador de energia pode ser apreciado como o custo total médio de construção e operação do ativo, por unidade de eletricidade total gerada ao longo de uma vida útil presumida.

O LCOE é citado como uma medida conveniente da competitividade de diferentes tecnologias de geração. Ele representa o custo por megawatt-hora, em unidades monetárias descontadas, da construção e operação de uma usina geradora durante todo seu ciclo de vida útil econômica.

O cálculo do custo nivelado de energia no Brasil é realizado pela metodologia proposta por Nakabayashi (2005) e pelo EIA (2018). Este valor, dado em R\$/MWh, é comparado ao preço da tarifa de energia elétrica vigente a fim de julgar a sua viabilidade com base no horizonte da vida útil dos sistemas.

O LCOE pode ser calculado tomando primeiro o valor presente líquido do custo total da instalação e operação do ativo gerador. Esse número é, então, dividido pela geração total de eletricidade ao longo de sua vida útil.

$$LCOE = \frac{\sum_t^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_t^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (9)$$

Sendo:

- I_t Despesas de investimento no ano t (R\$);
- M_t Despesas de operação e manutenção no ano t (R\$);
- F_t Despesas com combustível no ano t (R\$);
- E_t Geração de eletricidade no ano t (MWh);
- n Vida do sistema (anos);
- r Taxa de desconto (% a.a.);

Como alternativa, o LCOE pode ser estimado como o preço mínimo médio pelo qual é necessário vender a eletricidade gerada pelo ativo, a fim de compensar os custos totais de produção ao longo de sua vida útil. O cálculo do LCOE está relacionado ao conceito de avaliação do valor presente líquido de um projeto. De maneira semelhante ao uso do VPL, o LCOE pode ser usado para determinar se um projeto será um empreendimento que vale a pena.

O LCOE é uma métrica muito importante para determinar se deve ou não avançar em um projeto. O LCOE determinará se um projeto será equilibrado ou lucrativo. Caso contrário, a empresa não prosseguirá com a construção do ativo gerador e procurará uma alternativa. Usar o LCOE para avaliar um projeto é uma das primeiras etapas fundamentais tomadas na análise de projetos dessa natureza.

O LCOE também é um cálculo importante para permitir aos analistas financeiros comparar diferentes tecnologias produtoras de energia, como fontes de energia eólica, solar e nuclear. Ele permite essas comparações, independentemente da vida útil desigual, custos de capital diferentes, tamanho dos projetos e riscos diferentes associados a cada projeto. Isso ocorre porque o LCOE reflete um custo por unidade de eletricidade gerada, e o risco de cada projeto é uma implicação da taxa de desconto específica usada para cada ativo gerador de energia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cálculo da quantidade de esgoto por habitantes

Para o cálculo da vazão de esgoto efluente na ETE, foram utilizados os valores da população atendida com esgotamento sanitário e os dados acerca da quantidade de esgoto coletado, sendo que se calcula a produção de resíduos e esgotos por dia (SNIS, 2018).

Tabela 13 - Vazão de esgoto afluente por quantidade de habitantes

Cidades	População total atendida com esgotamento sanitário	Vazão de Esgoto Afluente (Q), (m³/dia).
Medianeira	14.981	2.267,67
Londrina	563.832	86.840,08
Curitiba	1.916.994	280.859,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.2 Cálculo do fator de correção para a temperatura de operação do reator

Utilizando a equação 5 e valores citados no decorrer na literatura do material e métodos, obtém-se o fator de correção (K(t)) para a temperatura operacional do reator. A Tabela 14 destaca o que se menciona.

Tabela 14 - Parâmetro utilizados para o cálculo do fator de correção para a temperatura operacional do reator

Parâmetros	Valores
Pressão atmosférica (P) (atm)	1
DQO correspondente a 1 mol de CH ₄ (k) (g DQO/mol)	64
Constante dos gases (R) (atm.L/mol.K)	0,08206
Temperatura operacional do reator (T) (°C)	30
Fator de correção para a temperatura operacional do reator (K(t)) (kg DQO/m ³)	2,57398394

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.3 Cálculo da quantidade de DQO efetivamente removido pelo reator

Na Tabela 15, foi apresentada a média dos dados de DQO efluente e eficiência de remoção de DQO do reator do tipo UASB, estimando-se o fluxo de DQO efetivamente removido pelo reator com a equação 2.

Tabela 15 - Parâmetros utilizado para o cálculo da quantidade de DQO efetivamente removido pelo reator

Parâmetros	Valores
DQO afluente (S_o) (kg DQO/m ³)	0,5216
Eficiência de remoção de DQO (E) (%)	75,33
DQO efluente (S) (kg DQO/m ³)	0,1225

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.4 Cálculo da vazão de metano

A vazão de esgoto efluente é relacionada ao IE e depende da capacidade da ETE. O potencial de produção de biogás de uma ETE é baseado na quantidade da demanda química de oxigênio (DQO) removida pelo reator e sua conversão em metano (CH₄), sendo chamada de DQO_{CH₄}. A vazão de metano (CH₄) é obtida da relação de DQO_{CH₄} com o fator de correção para a temperatura operacional do reator. Para efetuar os cálculos, foi considerada a concentração do metano na mistura bruta de 65% e Coeficiente de produção de sólidos no sistema de 0,23 (Kg DQO_{lodo}/Kg DQO_{aplicada}) (OLIVEIRA, 2009), conforme exibido na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros utilizados para o cálculo para produção de Metano

Coeficiente de produção de sólidos no sistema	0,23
(Y_{obs}) (Kg DQO _{lodo} /Kg DQO _{aplicada})	
%CH ₄	0,65

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Usando as equações 1, 3 e 4, bem como os dados nas Tabelas acima citados, obtém-se o potencial de produção de metano. Estes são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Potencial de produção de metano

Cidades	População total atendida com es- gotamento sanitá- rio	Vazão de Es- goto Afluyente (Q), (m³/dia).	DQO_{CH4} (kg/dia)	Q_{CH4} (m³/dia)	Q_{biogás} (m³/dia)
Medianeira	14.981	2267,67	619,008	240,486	369,979
Londrina	563.832	86840,08	23704,800	9209,381	14168,279
Curitiba	1.916.994	280859,04	76666,296	29785,071	45823,187

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.5 Cálculo da estimativa da potência gerada

Com a vazão de CH₄ calculada, pode-se, então, estimar o potencial de geração de energia elétrica, usando a equação 5, e os dados relacionados na Tabela 18, sendo o poder calorífico do biogás de 6,5 kWh/m³ para a mistura com concentração de metano de 65% (OLIVEIRA, 2009).

Tabela 18 - Parâmetros utilizados para o cálculo para potencial elétrico

Poder calorífico do CH ₄ (PCI CH ₄) (kWh/m ³)	9,97
Poder calorífico do biogás (PCI Biogás) (kWh/m ³)	6,5
Eficiência	0,2 e 0,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Com a vazão de CH₄ e a porcentagem de CH₄ removida, têm-se a vazão de biogás em m³/dia que deve ser transformada em m³/h e com eficiência de conversão de 20% e 30% para se estimar o potencial de produção de energia elétrica pela unidade de tratamento de esgoto, tendo como especificação do equipamento em kW, demonstrada na Tabela 19.

Tabela 19 - Potencial de produção de metano e biogás para cada localidade estudada

Cidades	População total atendida com esgotamento sanitário	$Q_{\text{biogás}}$	$Q_{\text{biogás}}$	P 20%	P 30%
		(m^3/dia)	(m^3/h)	(kW)	(kW)
Medianeira	14.981	369,979	15,416	19,980	29,971
Londrina	563.832	14.168,279	590,345	765,146	1.147,719
Curitiba	1.916.994	45.823,187	1.909,299	2.474,643	3.711,965

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Com os dados obtidos por meio dos cálculos, pode-se realizar as estimativas de economia da energia elétrica a partir do que foi gerado com a produção de biogás na ETE.

4.6 Estimativa da produção de biogás e potência gerada na ETE

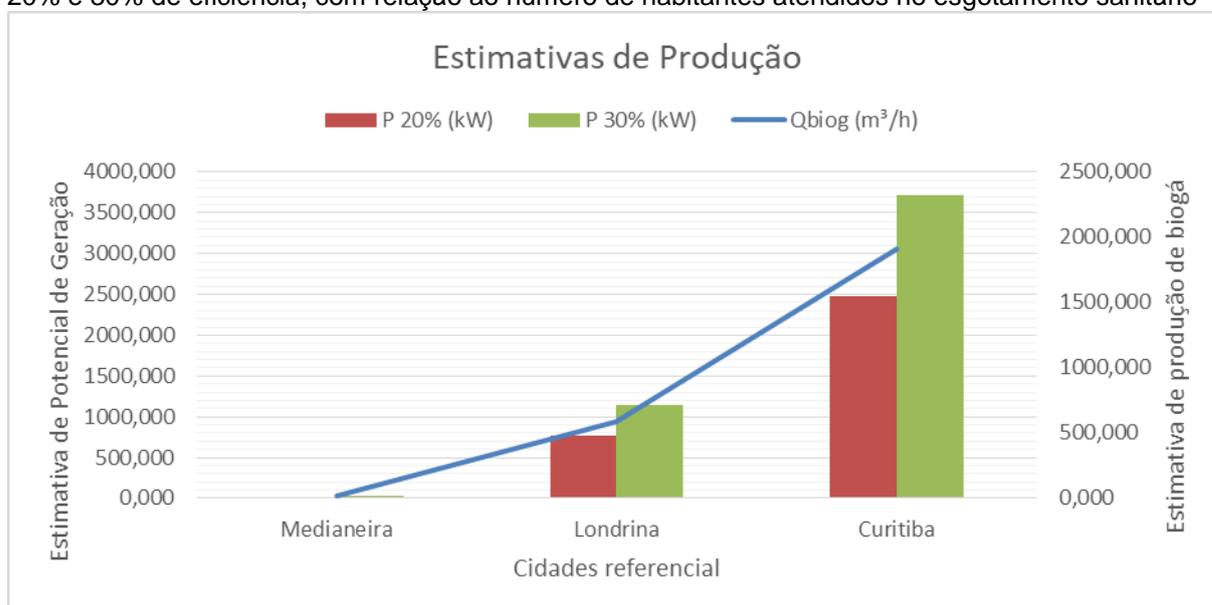
Na Figura 5 estão apresentadas as estimativas de produção de biogás e obtenção de potência gerada com variação de capacidade da ETE (habitantes) e a eficiência de conversão para potência elétrica de 20% e 30%, com todos os indicadores de habitantes.

É possível observar, na Figura 5, o quanto de biogás pode ser produzido, e como esse biogás deve ser utilizado para gerar energia elétrica. Sendo que em Medianeira representada com escala baixo com 14.981 habitantes atendidos com esgotamento sanitário tem potencial de produção de biogás de 15,416 m^3/h e uma estimativa de potencial de energia elétrica de 19,98 kW para 20% de eficiência e 29,971 kW para eficiente 30%. O patamar médio por habitante atendido de 563.832, que é representado pela cidade de Londrina, tem estimativa de 590,345 m^3/h , bem como potencial de geração de 20% e 30% de 765,146 kW e 1.147,719 kW, respectivamente. O patamar alto, representado pela cidade de Curitiba, com 1.916.994 habitantes atendidos em razão do esgotamento sanitário, atingiu a produção de biogás de 1.909,299 m^3/h . Com esse nível de produção de biogás, estima-se que o potencial de geração de energia elétrica alcance os níveis de

2.474,643 kW para 20% de eficiência e 3.711,965 kW para 30% de eficiência dos equipamentos de geração de energia.

No ano de 2018, o consumo de energia elétrica em sistema de esgotamento sanitário por horas foi de 615,12 kWh para cidade de Londrina e 2.691,56 kWh para cidade de Curitiba (SNIS, 2018). Portanto, o potencial de geração de energia elétrica com 20% de eficiência chega próximo de atender o consumo, porém a geração de 30% de eficiência provê a energia elétrica com sobras para que possa ser reaproveitada em outros consumos, como o tratamento de água.

Figura 5 - Estimativa da produção de biogás e estimativa de potencial de geração para geradores de 20% e 30% de eficiência, com relação ao número de habitantes atendidos no esgotamento sanitário



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.7 Valor presente líquido

Para os cálculos do valor presente líquido, foram estabelecidos os parâmetros com base na Tabela 20, assim como utilizadas as informações das estimativas de estação de tratamento de esgotos calculadas anteriormente.

A Tarifa da Resolução ANEEL nº 2.559 de 18 de junho de 2019, que apresenta correspondência com a tarifa horo-sazonal verde, subgrupo A4, é cobrada pela COPEL (Companhia de Energia Elétrica do Paraná), cujos valores são de 1,28701 R\$/kWh na ponta e 0,33929 R\$/kWh fora de ponta. Com isso, pode ser estabelecido um ganho monetário pela ETE ao evitar comprar energia da CE

(Companhia Energética), esse ganho foi considerado levando em conta que a ETE é taxada mensalmente no horário de ponta (3 horas por dia) e horário fora de ponta (21 horas por dia), com as tarifas mostradas na Tabela 20.

Tabela 20 - Variáveis para o cálculo de VPL

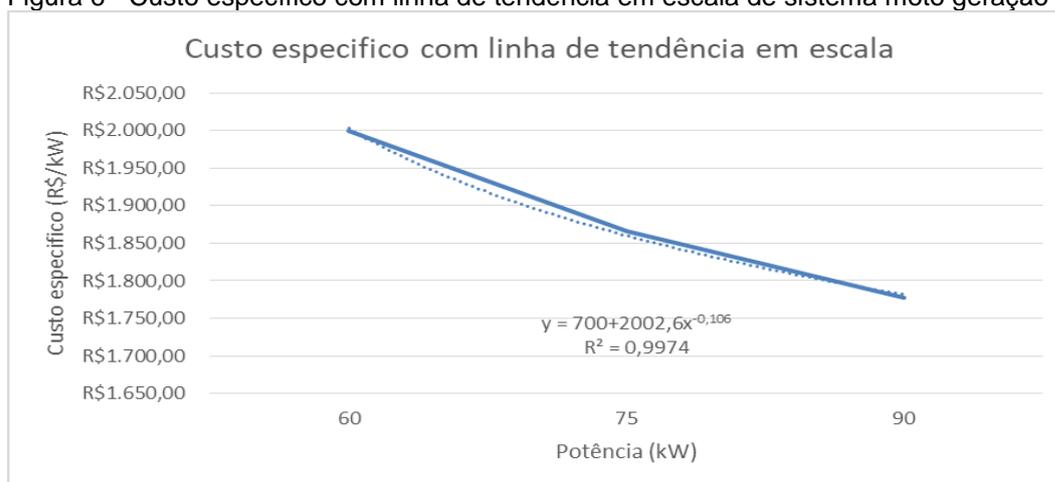
Variáveis	Valores
Tarifa na Ponta	1,28701 R\$/kWh
Tarifa Fora de ponta	0,33929 R\$/kWh
Hora de trabalho efetivo ao ano	8.000 h
Horas na ponta em 30 dias	59,523 h
Horas fora de ponta em 30 dias	607,143 h
Despesas de operação e manutenção em percentual.	4%a.a. (0,33%a.m.)
Taxa de desconto (d) ao mês	1% a.m.
Período (n) em meses	240 meses

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Por meio das ponderações obtidas na RN 482/2012 ANEEL, pode-se prever o gasto total que a ETE teria ao comprar energia da concessionária de energia elétrica local. Utilizando-se os dados de custo de sistema de geração de eletricidade com a Empresa Biogás Motores Estacionário LTDA, quando se tem os custos específicos (R\$/kW) da potência do equipamento.

Portanto, foi traçada uma linha de tendência e estimada a variação do custo específico em função da capacidade da planta de geração de eletricidade, obtendo-se uma equação de custo específico em escala para a função da potência de geração da planta. A Figura 6 mostra a linha de tendência.

Figura 6 - Custo específico com linha de tendência em escala de sistema moto geração



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O custo específico do equipamento do sistema de geração de eletricidade foi assumido em função do potencial da planta. Como mostra a equação 15.

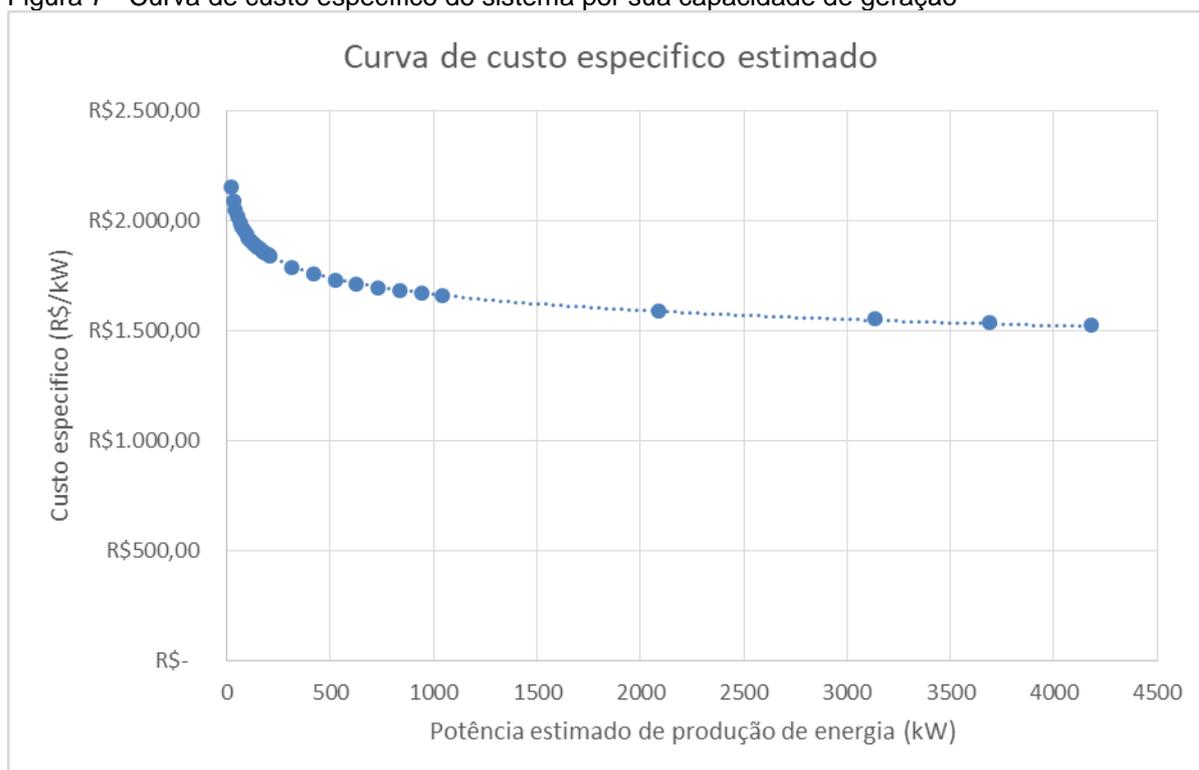
$$C_e = 700 + 2002,6 \cdot P^{-0,106} \quad (15)$$

C_e Custo específico (R\$/kW);

P Potência do sistema de motor gerador estimada para unidade de tratamento (kW);

A Figura 7 representa a curva de custo específico do sistema de geração de energia elétrica calculado para todas as variações de capacidade de produção de biogás das ETE, proporcional ao número de habitantes atendidos pela ETE. Consegue-se observar que quanto maior for a capacidade do sistema de geração ocorre uma queda do seu valor específico, comparando com os de baixa capacidade tornando o custo mais acentuado.

Figura 7 - Curva de custo específico do sistema por sua capacidade de geração



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Tabela 21 ressalta o valor do investimento em função do custo específico em escala, conforme a equação 15, para sistemas de geração de energia elétrica com eficiência de 20% e 30%.

Tabela 21 - Variáveis para o cálculo de VPL

Cidades	Eficiência do motor gerador	Potencial de geração (kW)	Custo Específico (R\$/kW)	Investimento (R\$)
Medianeira	20%	19,98	2.157,91	43.115,87
	30%	29,97	2.096,58	62.835,64
Londrina	20%	765,15	1.690,64	1.293.589,15
	30%	1.147,72	1.648,97	1.892.552,35
Curitiba	20%	2.474,64	1.574,75	3.896.933,78
	30%	3.711,96	1.537,95	5.708.802,26

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O levantamento dos custos e o investimento da geração de biogás não foram incluídos, pois foi considerado que as estações de tratamento de esgoto são contempladas com o uso do reator UASB no seu sistema de tratamento de efluente e há biogás disponível, sendo necessário só a sua captação para o motor gerador.

Os três principais itens de custo do sistema a ser implantado são: a mão de obra, os materiais (peças de reposição) e o custo com serviços subcontratados. Por sua relevância, os custos de manutenção vão se refletir no resultado econômico de uma organização. Nesse caso, será abordado o indicador para avaliar efetividade da estratégia de manutenção, sendo usado o custo de manutenção em função do Valor de Reposição do Ativo (RAV).

Há entidades internacionais que avaliam a eficácia de programas de manutenção como um percentual do valor de reposição deste ativo ou *RAV – Replacement of Asset Value*. O Valor de Reposição do Ativo é uma forma de auditar programas de manutenção estabelecendo a representatividade do custo anual de manutenção em relação ao valor de uma completa substituição do ativo. Assim, a manutenção se torna uma fração do custo total de aquisição do ativo. Quanto menor esse índice, maior é a geração de valor do programa de manutenção para a organização (DYNAMOX).

O custo de manutenção em 3% do RAV tornaria as práticas de manutenção dessa indústria entre as melhores do mundo. No entanto, os valores de operação e Manutenção foram estabelecidos com 4% do investimento por ano, deixado 1% para margem de segurança de riscos (WALTER, 2008), assim como o tempo de trabalho efetivo do equipamento de 8.000 h de trabalho. Assim, tem 760 h ao ano de parada para a manutenção do sistema de geração e essas horas foram divididas e descontadas no período de cada mês tendo como desconto por mês de 63,33 h. Destaca-se 666,667 h/mês de funcionamento entre essas horas de 59,523 h/mês com tarifa na ponta e 607,143 h/mês com tarifa fora de ponta.

Com essas variáveis, então, é possível estabelecer um fluxo de caixa para calcular o VPL, sendo a energia gerada e consumida pela própria ETE. Tem-se também uma economia no custo da tarifa de energia, portanto essa economia será a receita do fluxo de caixa. Para tais despesas, iremos considerar o custo de operação e manutenção. As Tabelas 22 a 27 destacam as cidades citadas anteriormente com o investimento aplicado com 20% e 30% de eficiência no motor gerador, receita, despesas e o resultante por período.

Para a construção do fluxo de caixa, existe o valor do investimento no momento zero com valor negativo (gasto). Tem-se, então, no momento 1 e adiante o valor do resultante mensal, sendo positivo, pois é o valor que está economizado. Para os cálculos, usa-se as médias e o fluxo de caixa é mantido de modo constante durante todo o período de análise, somente mudando o módulo dos vetores de acordo com cada cidade.

Tabela 22 - Valores para Fluxo de caixa com 20% de eficiência no motor gerador em Medianeira

Período (mês)	0	1	2	3	...
Investimento inicial	R\$ -43.115,87	-	-	-	...
Economia de Energia elétrica		R\$ 5.646,55	R\$ 5.646,55	R\$ 5.646,55	...
Custo de O&M		R\$ 143,72	R\$ 143,72	R\$ 143,72	...
Lucro (economizado)		R\$ 5.502,83	R\$ 5.502,83	R\$ 5.502,83	...

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 23 - Valores para Fluxo de caixa com 20% de eficiência no motor gerador em Londrina

Período (mês)	0	1	2	...
Investimento inicial	R\$ -1.293.589,15	-	-	...
Economia de Energia elétrica		R\$ 216.233,54	R\$ 216.233,54	...
Custo de O&M		R\$ 4.311,96	R\$ 4.311,96	...
Lucro (economizado)		R\$ 211.921,58	R\$ 211.921,58	...

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 24 - Valores para Fluxo de caixa com 20% de eficiência no motor gerador em Curitiba

Período (mês)	0	1	2	...
Investimento inicial	R\$ -3.896.933,78	-	-	...
Economia de Energia elétrica		R\$ 699.344,62	R\$ 699.344,62	...
Custo de O&M		R\$ 12.989,78	R\$ 12.989,78	...
Lucro (economizado)		R\$ 686.354,84	R\$ 686.354,84	...

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 25 - Valores para Fluxo de caixa com 30% de eficiência no motor gerador em Medianeira

Período (mês)	0	1	2	3	...
Investimento inicial	R\$ -62.835,64	-	-	-	...
Economia de Energia elétrica		R\$ 8.469,82	R\$ 8.469,82	R\$ 8.469,82	...
Custo de O&M		R\$ 209,45	R\$ 209,45	R\$ 209,45	...
Lucro (economizado)		R\$ 8.260,37	R\$ 8.260,37	R\$ 8.260,37	...

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 26 - Valores para Fluxo de caixa com 30% de eficiência no motor gerador em Londrina

Período (mês)	0	1	2	...
Investimento inicial	R\$ -1.892.552,35	-	-	...
Economia de Energia elétrica		R\$ 324.350,31	R\$ 324.350,31	...
Custo de O&M		R\$ 6.308,51	R\$ 6.308,51	...
Lucro (economizado)		R\$ 318.041,80	R\$ 318.041,80	...

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 27 - Valores para Fluxo de caixa com 30% de eficiência no motor gerador em Curitiba

Período (mês)	0	1	2	...
Investimento inicial	R\$ -5.708.802,26	-	-	...
Economia de Energia elétrica		R\$ 1.049.016,93	R\$ 1.049.016,93	...
Custo de O&M		R\$ 19.029,34	R\$ 19.029,34	...
Lucro (economizado)		R\$ 1.029.987,59	R\$ 1.029.987,59	...

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Com o fluxo de caixa já obtido, tem-se que efetuar os cálculos do VPL de acordo com a equação 7 e TIR com a equação 8. Será usada a taxa de desconto equivalente a taxa mínima de atratividade (TMA) de 1% a.m., pois está em um patamar considerável de investimento, em um período de 240 meses que corresponde a vida útil do equipamento.

Na Tabela 28 e 29, pode-se observar que os VPLs das cidades citadas estão todos com VPLs acima de 0 (zero) sendo que, então, todos os projetos de investimento são economicamente viáveis. Além disso, a Taxa de Retorno Interno

(TIR) está entre os valores de 12,76% a.m. a 18,04% a.m. estando acima do valor da taxa mínima de atratividade de 1% a.m., confirmando que o investimento é viável. Tem-se também o Payback, visto que o tempo de retorno do valor do investimento ficou entre 5 a 8 meses.

Tabela 28 - VPL, TIR e Payback com eficiência do motor gerador de 20%

Escala	Cidades	Investimento (R\$)	VPL (R\$)	TIR (%)	PayBack (meses)
Baixa	Medianeira	R\$ 43.115,87	R\$ 456.647,67	12,76%	8
Média	Londrina	R\$ 1.293.589,15	R\$ 17.953.004,63	16,38%	6
Alta	Curitiba	R\$ 3.896.933,78	R\$ 58.437.412,43	17,61%	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

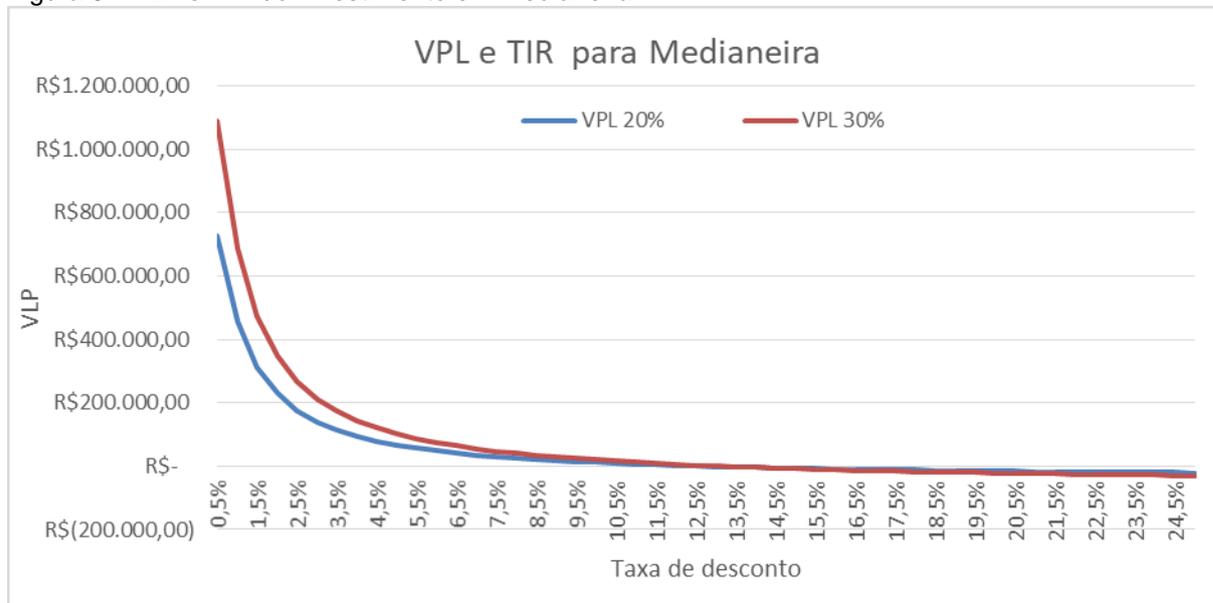
Tabela 29 - VPL, TIR e Payback com eficiência do motor gerador de 30%

Escala	Cidades	Investimento (R\$)	VPL (R\$)	TIR (%)	PayBack (meses)
Baixa	Medianeira	R\$ 62.835,64	R\$ 687.366,15	13,15%	7
Média	Londrina	R\$ 1.892.552,35	R\$ 26.991.818,37	16,80%	6
Alta	Curitiba	R\$ 5.708.802,26	R\$ 87.834.069,69	18,04%	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

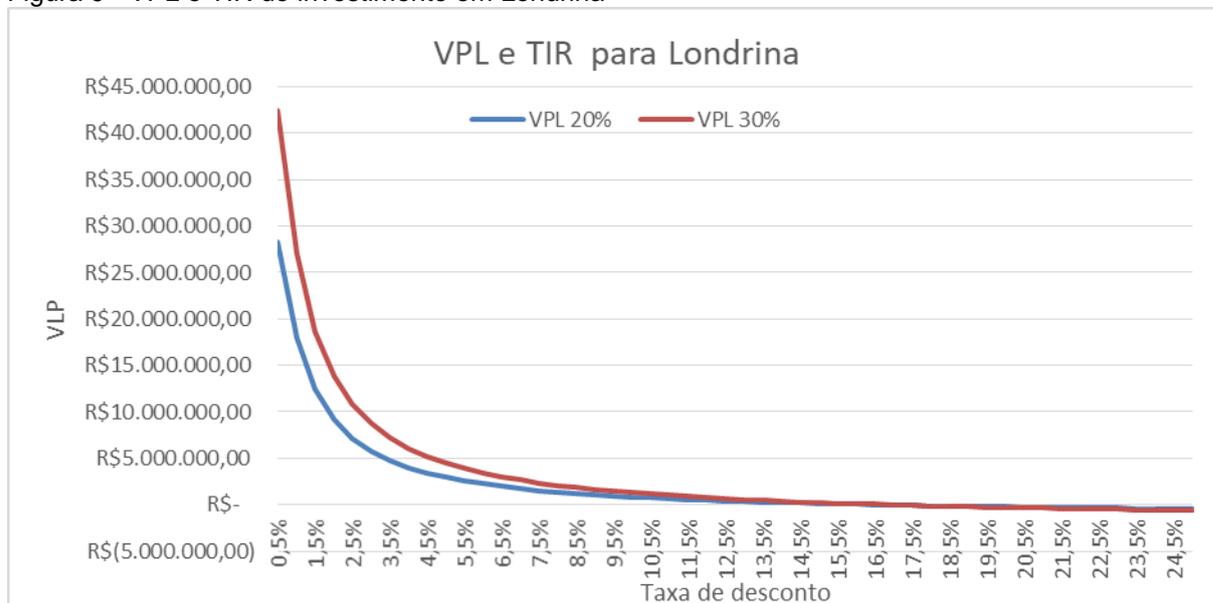
Observa-se, nas Figuras 8 a 10, o valor do VPL no decorrer do aumento da taxa de desconto. Com isso, tem-se que a curva do VPL cruza o eixo nas marcas entre 12,76% a 18,04% para as três cidades, bem como destaca-se o valor da TIR, isso corresponde que o TMA fica abaixo da TIR. Portanto, existe um valor positivo de VPL, tornado viável o investimento para ambas as cidades e sistemas de geração com 20% e 30% de eficiência.

Figura 8 - VPL e TIR do investimento em Medianeira



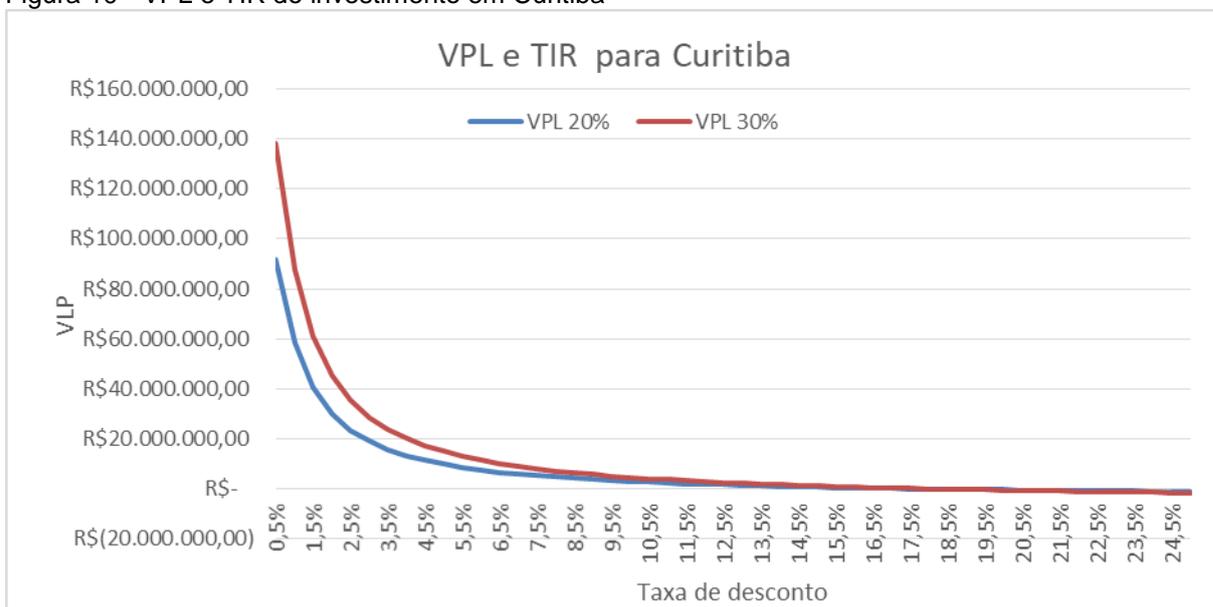
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 9 - VPL e TIR do investimento em Londrina



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

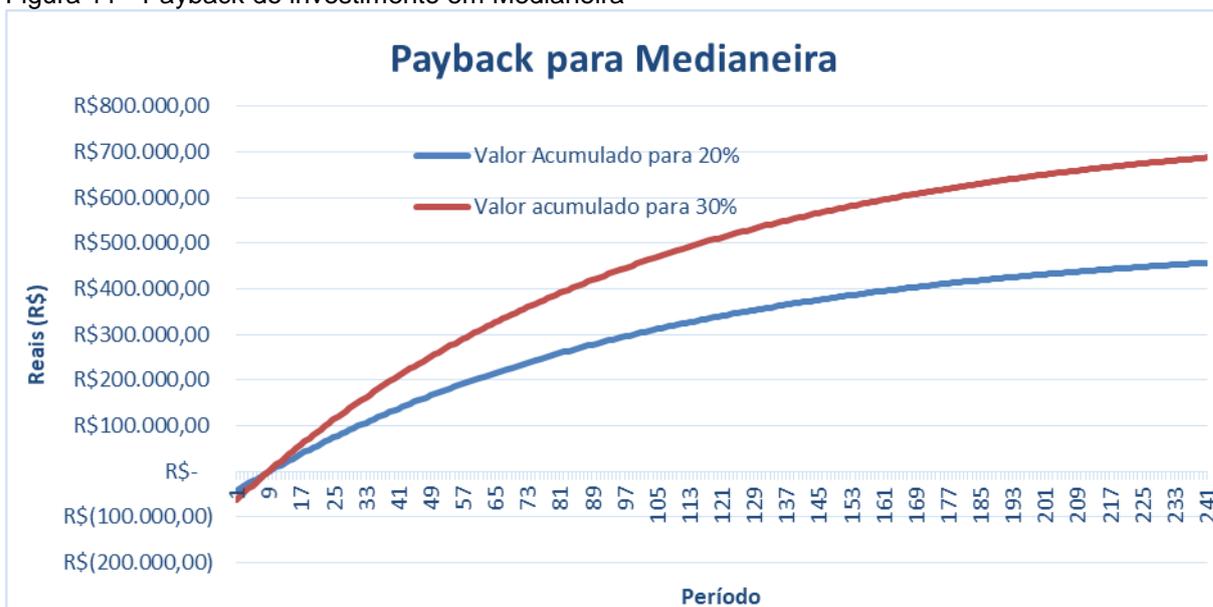
Figura 10 - VPL e TIR do investimento em Curitiba



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Já nas Figuras 11 a 13, observa-se que os valores dos capitais acumulados cruzam os eixos nas marcas entre 5 a 8 meses para as três cidades de estudo, assim representado o payback e o tempo que o projeto faz retornar o valor de investimento. A partir desse período, tem-se o lucro com o investimento.

Figura 11 - Payback do investimento em Medianeira



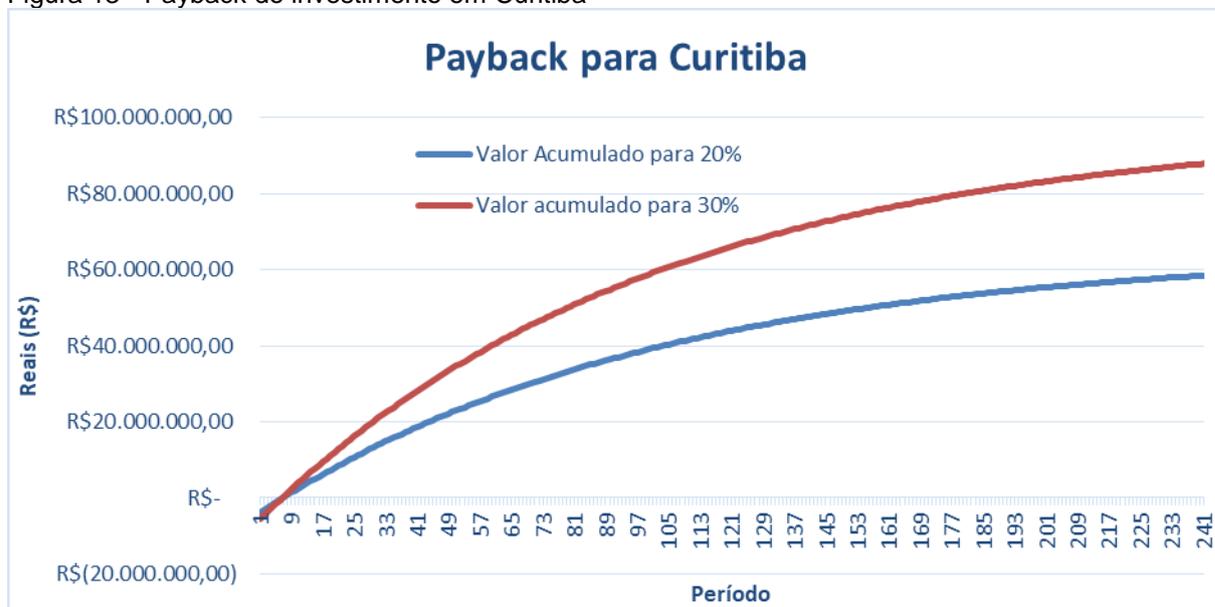
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 12 - Payback do investimento em Londrina



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 13 - Payback do investimento em Curitiba



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.8 Levelized Cost of Energy (LCOE)

O LCOE foi obtido a partir da equação 9, que relaciona o custo do valor de investimento, custo de manutenção e operação do sistema motor gerador com a quantidade de energia gerada, ambos reajustados para o valor presente.

Usada a potência de geração do sistema de motor gerador e do investimento inicial do mesmo, considerando que o custo de manutenção e operação do sistema seja 4% do investimento inicial para cada ano. E que as horas de trabalho do sistema no ano seja 8.000 horas, obtém-se então a quantidade de energia elétrica gerada anual. E utilizado a taxa de desconto de 12.68% a.a. equivalente a taxa de 1% a.m., e considerado a vida útil do sistema de 20 anos. Tem-se então o valor do LCOE com o uso da equação 9, demonstrada nas Tabelas 30 para a eficiência de conversão de 20% e na tabela 31 com a eficiência de 30%.

Tabela 30 - Valores para o cálculo de LCOE para motor gerador com 20% de eficiência

Cidades	Potência (MW)	Investimento (R\$)	Custo de Manutenção e Operação anual (R\$)	Energia Elétrica gerada anual (MWh)	LCOE (R\$/MWh)
Medianeira	0,01998	43.115,87	1.724,63	159,84322	48,45
Londrina	0,76514	1.293.589,15	51.743,57	6.121,16890	37,96
Curitiba	2,47464	3.896.933,78	155.877,35	19.797,14417	35,36

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

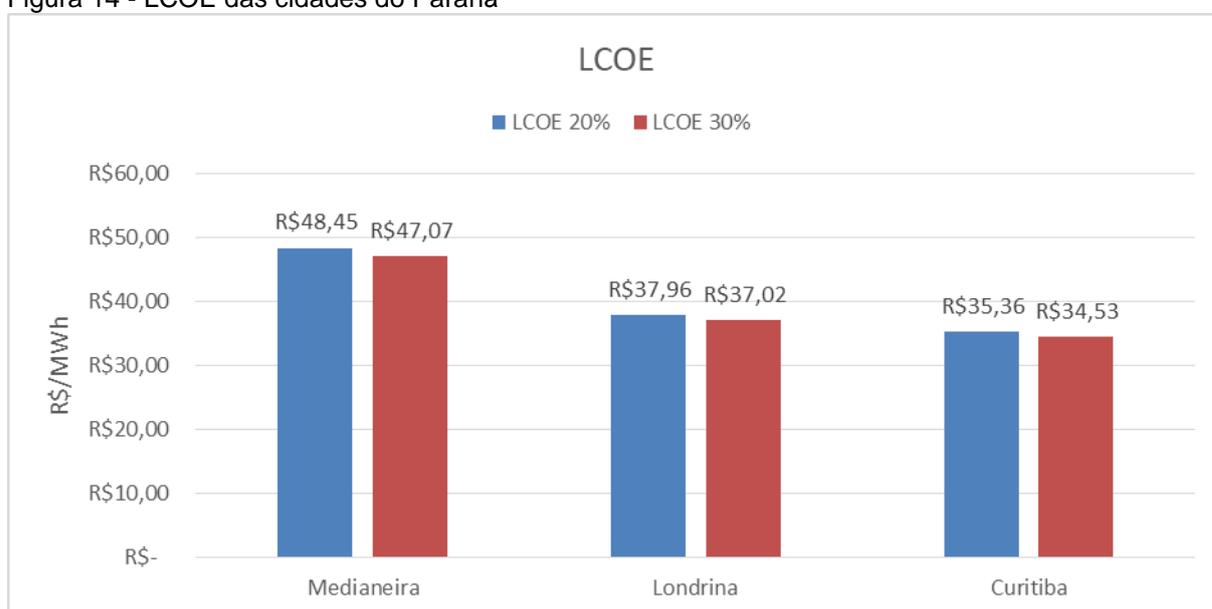
Tabela 31 - Valores para o cálculo de LCOE para motor gerador com 30% de eficiência

Cidades	Potência (MW)	Investimento (R\$)	Custo de Manutenção e Operação anual (R\$)	Energia Elétrica gerada anual (MWh)	LCOE (R\$/MWh)
Medianeira	0,02997	62.835,64	2.513,43	239,76483	47,07
Londrina	1,14772	1.892.552,35	75.702,09	9.181,75334	37,02
Curitiba	3,71196	5.708.802,26	228.352,09	29.695,71625	34,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Figura 14 evidencia que o custo nivelado de energia (LCOE) para a cidade de Medianeira obteve o valor de 48,45 R\$/MWh com 20% de eficiência do sistema de motor gerador e 47,07 R\$/MWh para com 30% de eficiência. Com isso, tem-se uma diferença de 1,38 R\$/MWh. Na cidade de Londrina, o LCOE ficou com 37,96 R\$/MWh com 20% eficiência e 37,02 R\$/MWh para 30% eficiência, com a diferença de 0,94 R\$/MWh. A cidade de Curitiba obteve LCOE de 35,36 R\$/MWh e 34,53 R\$/MWh para 20% e 30% de eficiência. Nesse caso, foi obtida uma diferença de 0,83 R\$/MWh.

Figura 14 - LCOE das cidades do Paraná



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Ao levar em conta a tarifa da resolução ANEEL nº 2.559 de 18 junho de 2019, correspondendo a tarifa horo-sazonal verde, subgrupo A4, somente o valor de fora de ponta que consiste no valor de 0,33929 R\$/kWh, corresponde a 339,29 R\$/MWh. Portanto, pode-se comparar o LCOE obtido com a tarifa. Nota-se que a cidade de Medianeira, com o maior valor de LCOE de 48,45 R\$/MWh, está 7 vezes menor que o valor da tarifa. No caso da cidade de Curitiba, tem-se o valor de 34,53 R\$/MWh e a comparação 9.8 vezes menor que a tarifa.

Em comparação com outras fontes de energia elétrica renovável como, por exemplo, o painel fotovoltaico, prevalece no Brasil um preço médio de 86,25 R\$/MWh no leilão 2019/4 da Secretaria Executiva de Leilões (SEL) (ANEEL, 2019).

O LCOE mais alto do estudo de 48,45 R\$/MWh tem uma comparação de 1,78 vezes menor.

No mesmo Leilão de 2019/04 (SEL), o preço médio da energia Eólica no Brasil foi de 101,06 R\$/MWh (ANEEL, 2019). Comparando o preço médio da energia eólica leiloadada com o maior LCOE obtida no estudo, tem-se que o LCOE é 2,08 vezes menor que o preço médio da energia eólica.

É notório que, quanto maior for a produção de biogás, pode ser instalado um sistema maior de motor gerado para poder satisfazer a produção de biogás. Ocorre, então, uma queda de valor de investimento em relação ao custo específico.

5 CONCLUSÕES

Procurou-se esclarecer o método de utilização do biogás, a partir do esgoto urbano, quanto à busca atual de novas fontes renováveis de energia para a matriz energética. Constatou-se que a geração de energia com biogás mostra resultados estimulantes por contribuir com a geração de energia.

Os resultados obtidos nas viabilidades econômicas realizadas mostram todos as simulações do uso de sistema motor gerador com aproveitamento do biogás em estações de tratamento de esgoto que são viáveis, pois todos os VPLs são positivos, sendo mais animador a TIR. Assim, existe uma variação de 12,76% a.m. a 18,04% a.m., sendo que o valor da taxa de desconto foi de 1% a.m., assim como a taxa SELIC é de 0,35% a.m. (2019). Portanto, tem-se uma grande margem para usar valores de taxa maiores de empréstimos e ainda obter um VPL positivo. Tem também o payback com menos de 12 meses sendo considerado um investimento de curto prazo.

Por intermédio dos resultados do custo nivelado de energia neste trabalho, os sistemas motores geradores com o maior valor correspondem a 42,41 R\$/MWh, e comparado com o valor da fatura de fora de ponta estabelecida no trabalho um valor de 339,29 R\$/MWh. Tem uma comparação que o LCOE obtido é pelo menos 7 vezes menor, portanto, é considerado um ótimo investimento.

Nesse sentido, o uso do biogás como fonte de combustível para geração de energia elétrica não é somente viável economicamente, mas também pode levar em conta alguns outros valores intangíveis como na variação de fonte de energia da matriz energética nacional, além de ocasionar a diminuição das emissões de gases poluentes e da contaminação dos mananciais de água. Dará condição econômica para tratar um volume maior de água e esgoto, ao apresentar uma fonte diferente de lucro no processo.

A produção energética, a partir do uso de um subproduto do processo do tratamento do esgoto, é o fator econômico mais importante por agregar valor ao que se considera resíduo, cujo destino final é o descarte no meio ambiente.

Políticas públicas devem ser efetivamente implementadas para incentivar com mais vigor a utilização desta fonte alternativa de geração de energia.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 28 dez. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 abril de 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Resolução Homologatória nº 2.559**, de 18 junho de 2019.

ANDRADE Neto, C. O. **Sistemas Simples para Tratamento de Esgotos Sanitários – Experiência Brasileira**. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229**: Projeto, Construção e Operação de Sistemas de Tanques Sépticos – Rio de Janeiro, 1997.

BARÉA L. C. Ralf, **Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente reduzindo custos e economizando energia no Tratamento de Esgotos**. Universidade de São Paulo, Curitiba, março de 2006.

BARRERA, P. **Biodigestores**: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. 2. ed. São Paulo: Ícone, 2003.

BELL, M. **Guia técnico DWA-M 361**: tratamento do biogás. Germany: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, 2011.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Embrapa: Jaguariúna, 2000.

BLEY Jr., C. **Biogas**: a energia invisível. 2. ed. São Paulo: CIBiogás, 2015.

BRASIL. **Ministério das Cidades**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, 2014. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás**. 1995. 130 p. Dissertação (Mestrado) - UNESP, Campus de Jaboticabal, 1995.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKKE, B. H. **Análise de Investimentos**. São Paulo: Atlas, 1994.

CENBIO. **Medidas Mitigadoras para a Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Geração Termelétrica**. Brasília, 2000.

CERVI, R. G. **Avaliação econômica do aproveitamento do biogás e biofertilizante produzido por biodigestão anaeróbia**: estudo de caso em unidade biointegrada. Universidade Estadual Paulista ‘Julio de Mesquita Filho’, Botucatu, Brasil, 2009.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Biogás: projetos e pesquisas no Brasil**. São Paulo, SP, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; BRESSANI-RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/technology**, v. 14, n. 4, 2015.

COELHO, S. T. et al. Programa de uso racional de energia e fontes alternativas – PUREFA. In: **Congresso Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável - ICTR**. São Paulo. Biodigestor modelo UASB. São Paulo: SP, 2003.

COELHO, S. T. A conversão da fonte renovável biogás em energia. In: **V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**, 31 de maio a 2 de julho de 2006, Brasília.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; VARKULYA, A. Jr.; PECORA, V. **Relatório de Acompanhamento - “Biodigestor Modelo UASB”**. São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2003.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. 2006.194f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2006.

CRAVEIRO, A. M. Consideração sobre projetos de plantas de biodigestão – Digestão anaeróbia e aspectos teóricos e práticos. In: **I Simpósio Latino-Americano sobre Produção de Biogás a partir de Resíduos Orgânicos**, São Paulo, dezembro de 1982.

CURADO, M.I.C. **Localização de perdas não técnicas de energia em sistemas de distribuição utilizando o método PQ**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2015.

DELAZARE, T. **Desnitrificação de esgoto Sanitário tratado a nível secundário através de biofiltros submersos utilizando comparativamente Metanol e Metano como fonte de Carbono**. 2004.174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

DELGROSSI BARROS; FRANÇA JUNIOR, A. T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto**. 2008. 148f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.

DYNAMOX. **Quais segmentos gastam mais com manutenção de máquinas industriais?** Disponível em: <<https://dynamox.net/gastos-com-manutencao-de-maquinas-industriais/>>. Acesso em: 28 dez. 2019.

DZ 215-R4. **Diretriz de controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem sanitária.** 2007. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mde0/~edisp/inea0014063.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

EIA (U.S. Energy Information Administration). 2018. **Annual Energy Outlook 2018 with Projections to 2050.** Washington, D.C.: U.S. Department of Energy. February 6, 2018. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf>.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDER ROSFTOFFE. **Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização,** Gulzow, Alemanha, 2010.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria.** Belo Horizonte, Brasil, 2015.

FEIDEN, A.; REICHL, J.; SCHWAB, J. et al. Avaliação da eficiência de um biogestor tubular na produção de biogás a partir de águas residuárias de suinocultura. In: **V Encontro de Energia no Meio Rural,** Campinas, 2004.

FERRA, J. M. G.; MARIEL, I. E. **Biogás, uma fonte alternativa de energia.** Brasil, 1980.

FILHO, J. A. C. **Biogás, independência energética do Pantanal Mato-grossense.** Circular técnica nº.9. Corumbá, EMBRAPA, 1981.

FRANÇA JUNIOR, A. T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.** 2008. 148p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Orientações Técnicas para Elaboração e Apresentação de Proposta e Projetos para Sistema de Esgotamento Sanitário – Engenharia de Saúde Pública.** Fundação Nacional de Saúde. Brasília, 2017.

FURTADO, M. de C. **Avaliação das oportunidades de comercialização de novas fontes de energias renováveis no Brasil.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.

GRYSCHKEK, J. M.; Belo, F. R. **Produção e uso do gás metano na agricultura e agroindústria.** Piracicaba, 1983.

IEA. 2005. **Biogas production and utilisation.** Disponível em: <www.ieabioenergy.com>. Acesso em: 25 out. 2019.

KARLSSON T. et al. **Manual Básico de Biogás.** Lajeado, Univates, 2014.

KHAN, A. A.; GAUR, R. Z.; TYAGI, V. K.; KHURSHEED, A.; LEW, B. Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 55, p. 1232-1251, 2011.

KLASS, D. L. **Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals**. San Diego, Academic Press, 1998.

LETTINGA G.; HULSHOFF POL L. W. UASB process design for various types of wastewater. **Wat. Sci. Tech**, v. 24, n. 8, p. 87-107, 1991.

LOPES, T. R. **Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbio e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais), UTFPR, 2015.

LUCAS JÚNIOR, J. **Estudo comparativo de biodigestores modelos Indiano e Chinês**, Botucatu, 1987. 114p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, 1987.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. Minho, Portugal: Pubindústria 2011.

MATSUURA, N.; HATAMOTO, M.; SUMINO, H.; SYUTSUBO, K.; YAMAGUCHI, T.; OHASHI, A. Recovery and biological oxidation of dissolved methane in effluent from UASB treatment of municipal sewage using a two-stage closed downflow hanging sponge system. **Journal of Environmental Management**, v. 151, p. 200-209, 2015.

MAZZUCCHI, O. A. J. **Biodigestor rural**. São Paulo, CESP, 1980.

METCALF, L.; EDDY, H. **Wastewater Engineering: treatment and reuse**. 4. ed. Revisado por George Tchobanoglous.; Franklin L.; Burton, H.; David Stensel. New York: McGraw -Hill, 2003.

MIGUEL, A. R.; BEVILACQUA, N.; GUERRA, P. A. D. V.; BAPTISTELLI, S. C. **Tra-tamento de águas residuárias domésticas**. In: ROMÉRO, M. A. PHILIPPI JR, A.; PHILIPPI JR., A.; BRUNA, G. C. **Panorama ambiental da metrópole de São Paulo**. São Paulo: Signus, 2004.

MIHIC, S. **Biogas fuel for internal combustion engines**. Annals of Faculty Engineering Hunedoara. Tome II, Facicole 3, 2004.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: viabilidade Econômica – março 2015**. Instituto de Energia e Ambiente da USP, Laboratório de Sistema Fotovoltaicos. Divulgado pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE).

NOGUEIRA, L.A.H. **Biodigestão: a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986.

OLIVEIRA, L. R. P. Biodigestor. Seminários Técnicos de Suinocultura. In: **VII Simpósio Goiano de Avicultura e II Simpósio Goiano de Suinocultura**. 13 e 15 de setembro, Goiânia, Goiás, 2005.

OLIVEIRA, S.M.A.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETES em operação no País, compreendendo diversas tecnologias. Parte I e Análise de Desempenho. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, p. 347 e 357, 2005.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono**. 2009. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Universidade de São Paulo, 2009.

OTTO, N. A. Motor Otto: o resgate de uma era. **Museu do Motor**. Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://www.mecânica.ufrgs.br/mmotor/otto.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

PEREIRA, M. G., CAMACHO, C.F., FREITAS, M. A. V., Silva, N. F. D. **The renewable energy market in Brazil: Current status and potential**. São Paulo: Elsevier, 2012.

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. 152 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERSSON, M. 2007. **Biogas upgrading and utilization as vehicle fuel**. European Biogas Workshop. The Future of Biogas in Europe III. Disponível em: <<http://ramiran.uvlf.sk/doc07/Biogas%20III/Proceedings%20Biogas.pdf#page=60>>. Acesso em: 25 out. 2019.

PIPATMANOMAI, S.; KAEWLUAN, S.; VITIDSANT, T. Economic assessment of biogás-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbono in small pig farm. **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p.669-674, 2009.

SCHRAM, I. B. **Sensibilidade do Custo da Energia Elétrica Fotovoltaica no Brasil Utilizando o Método de Monte Carlo**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2019.

SEGUEZZO, L.; ZEEMAN, G.; LIER, J. B.; HAMELERS, H. V. M.; LETTINGA, G. A. Review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. **Biore-source technology**. v. 65, p. 175-190, 1998.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **24º Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2018**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional Secretaria Nacional de Saneamento, 2019.

SGANZERIA, E. **Biodigestão: uma solução**. Agropecuária, Porto Alegre, 1983.

SMIL, V. Energy Resources and Uses: A Global Primer for the Twenty-First Century. **Current History**, v. 101, n. 653, pp. 126-132, 2002.

SOARES, R. C.; SILVA, S. R. C. M. **Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFT: Cuiabá, 2010.

SUZUKI, A. B. P.; FERNANDES, D. M.; FARIA, R. A. P. F.; VIDAL, T. C. M. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 221-327, 2001.

TACHINI, M.; BELLI FILHO, P.; PINEIRO, A. Avaliação do tratamento conjunto de lodo de tanques sépticos e esgotos domésticos em um RALF. In: **VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SIBESA**, 2002.

TRATA BRASIL. **Saneamento é saúde – Esgoto**, Brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/esgoto>>. Acesso em: 25 out. 2019.

US EPA. 2007. **Opportunities for and Benefits of Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities**. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000SJ5.PDF?Dockey=P1000SJ5.PDF>>. Acesso em: jan. 2020.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. Tratamento Anaeróbio de Esgotos: um Manual para Regiões de Clima Quente. **Epgraf**, Campina Grande, 1994.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG. 2016.

WALTER, P. **Qual o custo que a manutenção deve ter?**. Engenharias.net. blog. Brasil. 2008. Disponível em: <<https://engenharias.net/paulo-walter/2008/05/qual-o-custo-que-a-manutencao-deve-ter/#.XkWWQmhKhPY>>. Acesso em: 28 dez. 2019.

WEREKO-BROBBY, C. Y.; HAGEN, E. B. **Biomass conversion and technology**. New York: Editora John Wiley & Sons, 2000.

ZAGO, S. **Potencialidade de produção de energia através do biogás integrada à melhoria ambiental em propriedades rurais com criação intensiva de animais, na região do Meio Oeste Catarinense**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, 2003.

ZANETTE, André L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.