

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

MARINA COUTINHO BRITTO  
VITÓRIA PONTOGLIO ANDREO

Potencial energético do biogás de estação de tratamento de esgoto: avaliação das perspectivas  
técnica e econômica

São Carlos

2017



MARINA COUTINHO BRITTO  
VITÓRIA PONTOGLIO ANDREO

Potencial energético do biogás de estação de tratamento de esgoto: avaliação das perspectivas  
técnica e econômica

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Ambiental da Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Engenheiras Ambientais

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Márcia Helena  
Rissato Zamariolli Damianovic

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos  
2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P555,  
862p Pontoglio Andreo, Vitória, Coutinho Britto, Marina  
Potencial energético do biogás de estação de  
tratamento de esgoto: avaliação das perspectivas  
técnica e econômica / Coutinho Britto, Marina Pontoglio  
Andreo, Vitória; orientadora Márcia Helena Rissato  
Zamariolli Damianovic. São Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2017.

1. Biogás. 2. Estação de tratamento de esgoto. 3.  
Digestão anaeróbia. 4. Aproveitamento energético. 5.  
Payback. 6. Viabilidade econômica. I. Título.

# FOLHA DE JULGAMENTO

---

Candidato(a): **Marina Coutinho Britto e Vitória Pontoglio Andreo**

Data da Defesa: 31/10/2017

Comissão Julgadora:

Resultado:

**Profa. Dra. Márcia Helena Rissato Zamariolli Damianovic  
(Orientador(a))**

Aprovadas

**Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior**

APROVADAS

**Dr. Lucas Tadeu Fuess**

Aprovadas



**Prof. Dr. Marcelo Zaiat**

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação



*Dedicamos nosso trabalho ao professor que foi exemplo de amor à profissão e tivemos a honra em receber os ensinamentos, Professor João Luiz Boccia Brandão*

*Eu, Marina, dedico o presente trabalho à mulher que mais amo, minha mãe*

*Eu, Vitória, dedico nosso trabalho a mulher guerreira que me faz falta todos os dias. Dona Maria, sei que a senhora está nos olhando.*



## AGRADECIMENTOS

Agradecemos as nossas famílias pela proteção, carinho e compreensão dentre diversas personalidades e situações, e à estrutura a nós fornecida para chegarmos até aqui.

À professora Marcia Helena Zamariolli Damianovic pela orientação e flexibilidade com nossas limitações do momento, e aos demais professores da USP São Carlos, que contribuíram com nosso aprendizado e formação.

Aos amigos da turma Ambiental 012 pela força e companheirismo ao longo dos cinco anos de graduação. Aos veteranos de curso, pelas orientações e auxílio.

Às amigas que construímos ao longo das experiências em grupos de trabalho, Semana da Engenharia Ambiental - SEA - e Operação Natal, grandes responsáveis pelo nosso crescimento pessoal.

Ao Engenheiro Bruno de Souza Herdina pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Luis Felipe Peres Bucater pela amizade, honestidade e paciência.

Às amigas Marina Prado Camargo e Taissa Colucio Luders pela confiança, união e tantos bons momentos.

À coragem e parceria de cada uma nessa maratona final de conclusão de curso.

Eu, Marina, agradeço em especial à minha irmã Veronica Coutinho Britto por tamanho exemplo de coragem e determinação.

À Mariana Ueda Fernandes, Daniela de la Vega, Bruno Gonçalves Guillen e minhas companheiras da república Repeca, dentre todos que moraram comigo, pela paciência e apoio em momentos difíceis.

Ao Engenheiro Igor Hueb de Castro pela amizade e incentivo.

Eu, Vitória, agradeço em especial à minha mãe, por ser o meu maior exemplo de vida.

Ao Pedro Espuny, por me fazer sorrir nos dias difíceis, mostrando “o copo meio cheio”.

Às famílias Madri e Sanatório, pelas boas lembranças de convivência e companheirismo.



*“To be fully alive, fully human, and completely awake is to be continually thrown out of the nest. To live fully is to experience each moment as completely new and fresh. To live is to be willing to die over and over again”*

Pema Chödrön



## RESUMO

ANDREO, V. P.; BRITTO, M. C. **Potencial energético do biogás de estação de tratamento de esgoto: avaliação das perspectivas técnica e econômica.** 2017. 91 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

O biogás gerado em estações de tratamento de esgoto (ETE) atualmente é queimado antes de atingir o ambiente, desprezando seu potencial energético para gerar eletricidade. O objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade econômica da instalação de geração de energia fornecida pelo biogás gerado em estações de tratamento de esgoto com sistemas de reator UASB e biodigestor adicionado ao sistema de lodos ativados. Para a comparação, adotou-se ETes com vazão afluyente equivalente à contribuição de 100.000 habitantes. Para aproximar à aplicação, desenvolveu-se estudos de caso para cada tipo de tratamento, utilizando dados reais das ETes de São Carlos/SP e Franca/SP. A análise de viabilidade econômica de *payback* para UASB e lodos ativados resultou em 4,7 meses e 6,0 meses, respectivamente. O Valor Presente Líquido (VPL) para 20 anos indicou retorno de R\$ 5.473.145,28 para UASB e R\$ 4.188.236,63 para lodos ativados. Concluiu-se que o UASB apresenta maior geração de biogás total cuja conversão em eletricidade tem tempo de retorno de investimento menor que o de lodos ativados. Além disso, os cenários de estações reais mostraram que os valores teóricos de carga orgânica utilizados – DBO de 300 mg/L para UASB - foram superiores aos reais; DBO de 167 mg/L em São Carlos; indicando que a caracterização do esgoto, afluyente ao sistema de tratamento objeto de estudo, deve ser avaliada, cuidadosamente, em cada situação.

**Palavras-chave:** biogás; estação de tratamento de esgoto; digestão anaeróbia; aproveitamento energético; *payback*; viabilidade econômica.



## ABSTRACT

ANDREO, V. P.; BRITTO, M. C. **Energy potential of sewage treatment plant biogas: evaluation of technical and economic perspectives.** 2017. 91 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

The biogas generated in sewage treatment plants is currently burned before reaching the environment, neglecting its energy potential to produce electricity. The objective of this work was to analyze the economic viability of the power generation facility provided by sewage treatment plants biogas with UASB reactor system and biodigester combined with activated sludge system. In order to compare, it was considered treatment plants with an affluent flow equivalent to the contribution of 100,000 habitants. Aiming to approximate the results of reality, a case study was developed for each type of treatment, using real data of sewage characteristics from cities of São Carlos (SP) and Franca (SP). Payback results of UASB and activated sludge showed the need of 5.1 months and 6.5 months, respectively. The Net Present Value (NPV) for 20 years indicated a return of R\$ 5,445,117.69 to UASB and R\$ 4,160,209.04 for activated sludge. It was concluded the UASB presents a larger generation of total biogas that requires a smaller return of investment time than the activated sludge one. In addition, the actual station scenarios demonstrate that the values of organic load meters used - BOD of 300 mg/L for UASB - were higher than real; BOD of 167 mg/L in São Carlos; indicating that the characterization of the sewer, affluent to the treatment system under study, should be evaluated for each situation.

**Keywords:** biogas; wastewater treatment; anaerobic digestion; energy use; payback; economic viability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados.....	27
Figura 2 - Esquema de funcionamento e fluxos do reator UASB.....	29
Figura 3 - Fluxograma das etapas da biodigestão anaeróbia.....	33
Figura 4 - Vista frontal, em corte, do reator anaeróbio modelo indiano.....	38
Figura 5 - Vista frontal, em corte, do reator anaeróbio modelo chinês.....	38
Figura 6 - Esquemas de turbinas Ciclo Brayton.....	40
Figura 7 - Componentes do sistema da microturbina.....	41
Figura 8 - Esquema do funcionamento de um motor ciclo Otto.....	43



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Domicílios particulares permanentes, total e respectiva distribuição percentual, por situação do domicílio e tipo de saneamento, segundo as Grandes Regiões - 2010.....	24
Tabela 2 - Comparação entre o balanço energético de processos aeróbio e anaeróbio de tratamento de efluentes <sup>1</sup> (valores em kJ/d).....	29
Tabela 3 - Composição do Biogás.....	36
Tabela 4 - Variação do poder calorífico conforme composição do biogás.....	36
Tabela 5 - Comparação entre as tecnologias de conversão energética de biogás.....	43
Tabela 6 - Capacidade de geração da matriz de energia elétrica brasileira em operação - novembro/2017.....	47
Tabela 7 - Valores típicos para tratamentos aeróbio de lodos ativados convencional <sup>1</sup> .....	54
Tabela 8 - Custo de investimento inicial – primeiro ano de operação.....	69
Tabela 9 - Comparativo dos sistemas de tratamento e a economia gerada em cada um deles pela geração de energia.....	70
Tabela 10 - Resumo dos valores de vazão de metano e biogás obtidos a partir de diferentes metodologias.....	71
Tabela 11 - Análise de fluxo de caixa ano a ano - <i>payback</i> .....	72
Tabela 12 - Análise de fluxo de caixa ano a ano - VPL.....	73
Tabela 13 - Análise de fluxo de caixa ano a ano para as estações de estudo de caso - VPL ...	77



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	Esgoto sanitários.....	23
2.1.1	Histórico do saneamento no Brasil.....	23
2.1.2	Caracterização.....	24
2.1.3	Processos de tratamento de esgoto.....	25
2.2	Biogás.....	30
2.2.1	Histórico.....	30
2.2.2	Processo de formação do biogás: biodigestão anaeróbia.....	31
2.2.3	Caracterização dos gases do biogás.....	35
2.2.4	Sistemas de produção de biogás.....	37
2.2.5	Geração de energia elétrica.....	39
2.2.6	Aspectos econômicos e ambientais.....	43
2.3	Mercado de energia.....	44
2.3.1	A matriz de energia elétrica do Brasil.....	46
2.3.2	Políticas e incentivos às fontes renováveis.....	47
2.3.3	Estudos de caso.....	50
3	METODOLOGIA.....	52
3.1	Quantificação da vazão de afluente à ETE.....	52
3.2	Quantificação do volume de biogás produzido em reatores UASB.....	52
3.3	Quantificação do volume de biogás gerado na digestão anaeróbia do lodo gerado no sistema de lodos ativados convencional (L.A.).....	54
3.4	Potencial energético do biogás gerado em Reator UASB e L.A.....	56
3.5	Economia pela injeção da energia gerada na rede de distribuição.....	57
3.6	Análises de viabilidade econômica.....	58
3.6.1	Análise dos custos de adesão do sistema de geração de energia.....	60

3.6.2	Análise de <i>payback</i> .....	63
3.6.3	Análise de Valor Presente Líquido (VPL) .....	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	65
4.1	Quantificação da vazão de afluente à ETE .....	65
4.2	Sistema de tratamento anaeróbio – Reator UASB .....	65
4.2.1	Quantificação do volume de biogás produzido em reator UASB .....	65
4.2.2	Potencial energético do biogás gerado no reator UASB .....	66
4.2.3	Economia pela injeção da energia gerada no reator UASB na rede de distribuição .....	66
4.3	Sistema de tratamento aeróbio – Lodos ativados convencional com biodigestor .....	66
4.3.1	Quantificação do volume de biogás produzido no sistema de L.A. ....	66
4.3.2	Potencial energético do biogás gerado no sistema de L.A. ....	67
4.3.3	Economia pela injeção da energia gerada no sistema de L.A. na rede de distribuição .....	68
4.4	Análise de custos de implantação do sistema .....	68
4.5	Análise de viabilidade econômica .....	71
4.5.1	<i>Payback</i> .....	71
4.5.2	Valor Presente Líquido (VPL) .....	72
5	ESTUDOS DE CASO .....	75
5.1	ETE Monjolinho – São Carlos/SP .....	75
5.2	Estação de Tratamento de Esgoto de Franca – Franca/SP .....	76
6	CONCLUSÃO .....	80
	REFERÊNCIAS .....	82
	ANEXO I .....	87
	ANEXO II .....	89
	ANEXO III .....	91

## 1 INTRODUÇÃO

O último balanço energético nacional, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), indica que o consumo de energia aumentou em mais de 70% nos últimos 10 anos no Brasil, sendo que apenas entre os anos de 2008 e 2012, o consumo nacional apresentou um aumento de 87%. Além de retratar o aquecimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, o aumento do consumo de energia elétrica também reflete no risco do esgotamento dos recursos utilizados para a geração, bem como o impacto ao meio ambiente causado por essa atividade.

Assim como a preocupação energética, a atenção com o meio ambiente tem crescido consideravelmente na última década e assuntos como aquecimento global e efeito estufa tornaram-se pautas recorrentes em encontros entre os líderes globais. A emissão de gases poluentes, como os gases de efeito estufa (GEE), têm sido frequentemente questionadas e alternativas à não-emissão estão se fortalecendo. Fator motivador desse crescimento é a participação do Brasil no Acordo de Paris de 2015 com o compromisso de redução das emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025.

Para alcançar o objetivo, o país definiu suas contribuições como sendo 18% de participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética até 2030, 12 milhões de hectares de florestas restaurados e 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

Desta forma, buscando a diversificação e o atendimento da crescente demanda, as fontes renováveis têm sido incentivadas e incorporadas à matriz energética mundial, por meio de subsídios e legislações que buscam regulamentar a exploração de novas fontes energéticas, como a solar e a biomassa.

As estações de tratamento de esgoto também fazem parte do grupo que contribui potencialmente com a para emissão de GEE, uma vez que em seu processo há a produção, direta ou indiretamente, de metano – gás extremamente nocivo à camada de ozônio. Buscando amenizar o dano gerado, o mesmo é queimado, gerando um gás menos agressivo, - o gás carbônico. Por outro lado, o gás metano possui um poder calorífico considerável – cerca de 2 vezes maior que o do etanol –, podendo ser utilizado como combustível e fonte energética.

A Estação de Tratamento de Águas Residuais de Portland - Estados Unidos - gera, em média, 600 milhões de pés cúbicos de biogás por ano como um subproduto da digestão

anaeróbia. A composição é próxima de 60% de metano e é uma alternativa renovável ao gás natural. A fábrica implementou várias tecnologias para recuperar o biogás para produzir calor e energia para operações no local e outras instalações. Em 2009, a Environmental Services instalou dois motores com geradores GE / Jenbacher de 850 kW com capacidade total de geração de 1,7 megawatts. A planta recupera o calor da água e do escape do motor para usar em seus digestores anaeróbicos. O conjunto de geradores e motores fornece cerca de 40% da demanda elétrica da ETE. (CITY OF PORTLAND, 2017). A estação de tratamento também comprime cerca de 20% de seu biogás e entrega via canalização para uma instalação industrial próxima para usar no processo de aquecimento. Esta é uma parceria muito bem-sucedida desde 1986.

Portanto, alinhando a necessidade energética e a redução das emissões de poluentes, tem-se em estações de tratamento de esgoto um cenário propício para o investimento em tecnologias de aproveitamento energético do metano, agregando os princípios ambientais de tornar resíduos em matéria primas de outros processos. Sabendo-se que a maioria das ETEs está sob responsabilidade do poder público, despertar o interesse para novos investimentos é um desafio ainda maior que em empreendimentos privados, por isso buscou-se analisar viabilidade econômica de implantação dos sistemas de geração de energia elétrica pelo biogás produzido em ETEs já existentes. A abrangência do estudo envolve esgoto produzido em cidades com população acima de 100.000 habitantes e comparação entre sistemas de tratamentos anaeróbio - UASB – e aeróbio combinado - lodos ativados com biodigestores.

A energia elétrica gerada a partir de um resíduo da ETE é classificada como reaproveitamento e, também, prevenção de emissão de gases do efeito estufa – metano e gás carbônico. O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a viabilidade econômica da energia gerada pelo biogás produzido em ETEs, comparando as diferentes tecnologias de geração do biogás.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção são apresentados conceitos referentes à situação do saneamento no Brasil, tecnologias de tratamento, geração e aproveitamento do biogás, bem como a caracterização da matriz energética e o mercado de energia brasileiros, e estudos de caso de cidades que já possuem projetos de aproveitamento energético do biogás gerado nas estações de tratamento de efluentes.

### 2.1 Esgoto sanitários

#### 2.1.1 Histórico do saneamento no Brasil

Historicamente no Brasil, as iniciativas que buscavam a evolução da saúde pública e meio ambiente no setor de saneamento mostraram-se pontuais e espaçadas ao longo do século XX. Apenas na década de 70 consolidou-se o Plano Nacional de Saneamento (Planasa), trazendo força aos índices de abastecimento de água – mesmo sem aumentar o incentivo à coleta e tratamento de esgoto –, pois existia um “predomínio da visão de que avanços nas áreas de abastecimento de água e de esgotamento nos países em desenvolvimento resultariam na redução das taxas de mortalidade” (SOARES; BERNARDES; CORDEIRO NETTO, 2002:1715).

Atualmente, o cenário brasileiro estimado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é de que mais de 71% dos domicílios particulares permanentes urbanos possuem o saneamento considerado adequado, como mostra a Tabela 1.

Ainda que a média nacional e a taxa de abrangência das redes de saneamento adequadas estejam acima de 50% na maior parte das regiões do país, observa-se que a região norte, mesmo nos domicílios da área urbana, possui um déficit nos sistemas de saneamento. Por mais que os índices de atendimento tenham aumentado em relação aos anos anteriores, a solução ainda merece atenção. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento - SNIS (BRASIL, 2016), menos de 10% dos esgotos gerados nas áreas urbanas são coletados na região Norte.

Tabela 1 - Domicílios particulares permanentes, total e respectiva distribuição percentual, por situação do domicílio e tipo de saneamento, segundo as Grandes Regiões - 2010

Regiões	Domicílios particulares permanentes urbanos			
	Total	Distribuição percentual, por tipo de saneamento (%)		
		Adequado <sup>(1)</sup>	Semi-adequado <sup>(2)</sup>	Inadequado <sup>(3)</sup>
<b>Brasil</b>	49 226 749	71,2	28,1	0,8
<b>Norte</b>	3 012 377	29,0	68,0	3,0
<b>Nordeste</b>	11 199 958	52,3	46,1	1,7
<b>Sudeste</b>	23 539 756	87,5	12,2	0,3
<b>Sul</b>	7 615 138	74,3	25,5	0,2
<b>Centro Oeste</b>	3 859 520	52,8	46,6	0,7

Fonte: IBGE (2011) adaptado

<sup>(1)</sup> Abastecimento de água por rede geral, esgotamento sanitário por rede geral ou fossa séptica e lixo coletado diretamente ou indiretamente. <sup>(2)</sup> Domicílio com pelo menos uma forma de saneamento considerada adequada. <sup>(3)</sup> Todas as formas de saneamento consideradas inadequadas.

Segundo os indicadores sociais por município do IBGE (2011), aproximadamente 55% da população brasileira reside em municípios com mais de 100.000 habitantes. No Brasil, em média, 84,4% dos domicílios com saneamento é urbano, mais especificamente, nos municípios com população acima de 100.000, essa taxa ultrapassa 90%.

### 2.1.2 Caracterização

O esgoto sanitário, de acordo com a norma brasileira NBR 9648, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1986), é o despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e contribuição pluvial. Já o esgoto doméstico é definido como o despejo resultante do uso da água para higiene e necessidade fisiológicas da população.

De forma análoga, van Haandel e Lettinga (1994) definem como esgoto, a água eliminada após a utilização humana; a qual, quando não tratada adequadamente, pode afetar os recursos hídricos e a fauna e flora ao poluir os cursos d'água; além de causar possíveis danos à saúde pública com a transmissão de doenças de veiculação hídrica.

Segundo Von Sperling (1996), os danos à saúde são acarretados pela presença dos microrganismos patogênicos, como algumas bactérias. Entre as comunidades bacterianas encontram-se as dedicadas à depuração da matéria orgânica e nitrogenada, de extrema importância para a eficiência dos processos de tratamento.

Os esgotos domésticos são constituídos, primeiramente por matéria orgânica biodegradável, microrganismos, nutrientes (nitrogênio e fósforo), óleos e graxas, detergentes e metais (BENETTI E BIDONE, 1995).

Além de sólidos, o esgoto possui gases dissolvidos em diferentes concentrações, destacando-se a presença de gás carbônico, nitrogênio, gás sulfídrico e metano (VON SPERLING, 1996).

De acordo com Chernicharo (2007), os esgotos sanitários contêm, aproximadamente, 99,9% de água. A fração restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. Portanto, é devido a essa fração de 0,1% que há necessidade de tratarem-se os esgotos.

### 2.1.3 Processos de tratamento de esgoto

A configuração padrão de uma estação de tratamento é, frequentemente, composta por sistemas de tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário. No sistema preliminar, removem-se os sólidos grosseiros por obstrução e areias por sedimentação, visando preservar os equipamentos e o funcionamento das unidades subsequentes. No sistema primário, o objetivo principal é a remoção de sólidos sedimentáveis por processos físicos, ou físico-químicos, quando necessários. O sistema secundário destina-se a remover grande parte dos sólidos dissolvidos e finamente particulados e matéria orgânica por meio de processos biológicos. Na última etapa, tratamento terciário, o foco é a remoção de substâncias indesejáveis, como nitrogênio e fósforo. O polimento do efluente pode ser dado em unidades de tratamento avançado e pela remoção de organismos patogênicos (VON SPERLING, 1996).

Considerando o papel essencial para qualidade de vida de populações, faz-se necessário o investimento, municipal e/ou privado, em estações de tratamento. Dentre muitas estratégias analisadas para redução de custos e otimização dos mesmos, é discutido o reaproveitamento energético por certos resíduos combustíveis do processo de tratamento. A água resultante do tratamento já possui diversas formas de reutilização, até mesmo, na própria estação seja por irrigação e/ou lavagem de área externas. O sistema de tratamento é definido com base em análises prévias da região e concentrações no esgoto afluente de forma a buscar a tecnologia capaz de transformar o resíduo em efluente final de qualidade adequada ao destino proposto (LIMA, 2005). Segundo Von Sperling, 2007, outros fatores para escolha do sistema da ETE são eficiência, custos de manutenção, disponibilidade de área construtiva, impactos ambientais, disposição do lodo gerado, custos de operação e manutenção, vida útil do projeto,

confiabilidade e simplicidade. Sendo assim, diversos processos individuais e combinados devem ser estudados para que se aplique a melhor alternativa ambiental e econômica.

O tratamento primário, na maioria das vezes, utiliza processos mais simples, por exemplo, a sedimentação em decantadores primários. Nestes, os sólidos em suspensão devem se acumular no fundo do tanque para serem recolhidos e descartados. O efluente, já com menor DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio -, entrará no sistema de tratamento secundário representado por lagoas de estabilização, lodos ativados, reatores anaeróbios, reatores aeróbios com biofilme, dentre outros (VON SPERLING, 2007). Segundo Lima (2005), os microrganismos consomem a matéria orgânica para seu crescimento celular e atividade metabólica de maneira que eles se aglomeram e sedimentam, tornando o efluente cada vez mais incolor e purificado.

A biotecnologia no tratamento de despejos líquidos é uma aplicação cujas teorias cinéticas e de dimensionamento ainda estão sendo aprimoradas.

Para a utilização deste tratamento, necessita-se de três fatores principais:

- Contato entre a biomassa (microrganismos) e despejo de forma adequada e em relações constantes;
- Maior quantidade de biomassa acumulada no reator (tempo de residência dos microrganismos ou idade do lodo maior que o tempo de detenção hidráulica)
- Melhor atividade da biomassa;

No dimensionamento de reatores, a idade do lodo maior auxilia a reduzir a produção de lodo, pela mineralização parcial, e manter a população de reserva ativa. Também, busca-se menor TDH (Tempo de Detenção Hidráulica) para que a construção do reator seja mais econômica devido a um menor volume necessário (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

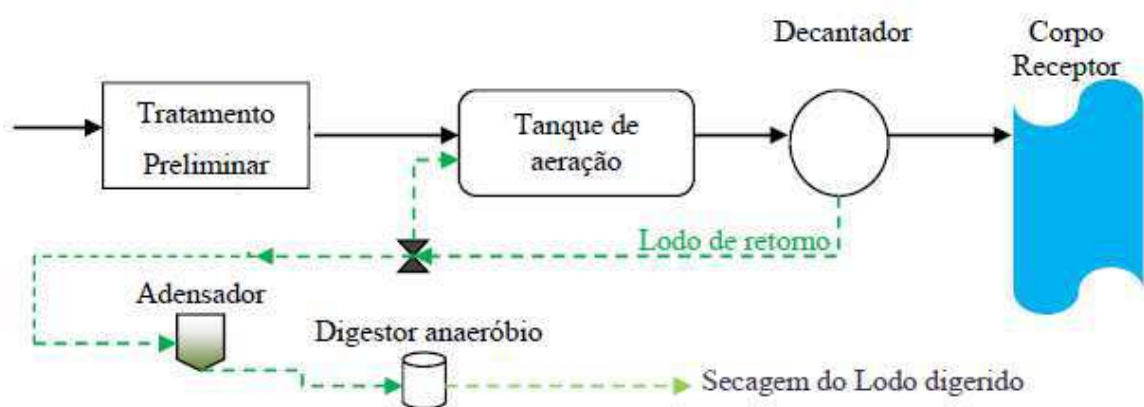
Muitas são as alternativas para tratamento de esgoto disponíveis. Entre elas, destacam-se algumas largamente utilizadas no Brasil.

O sistema de lagoas é uma alternativa importante para regiões de clima quente e com efluentes de maior carga orgânica. Entretanto exige grande área para instalação. As configurações de sistemas em lagoas de estabilização podem ser compostas por lagoas aeradas, facultativas, anaeróbias ou de maturação. As lagoas aeradas mecanicamente são aplicadas para tratamentos com sobrecarga prevista. As lagoas facultativas apresentam fotossíntese de algas e ventilação superficial como origem do oxigênio e, ao mesmo tempo,

sedimentação no fundo devido à formação de um ambiente anaeróbio. As lagoas anaeróbias, instaladas no início do sistema, têm a função de reduzir a carga orgânica, principalmente a fração particulada, previamente às lagoas facultativas. Ao contrário, lagoas de maturação assemelham-se à etapa do tratamento terciário responsável por desinfecção específica do esgoto.

No sistema de lodos ativados, as bactérias aeróbias consomem o substrato no reator. A sedimentação dos flocos, formados pela junção entre bactérias, fungos e protozoários, ocorre sequencialmente no decantador secundário, que permite a recirculação de biomassa ativa para o tanque de aeração, incrementando a eficiência global do processo. Nesse processo ocorre a desvinculação do tempo de detenção hidráulica do tempo de detenção celular, reduzindo o volume da unidade. O ar, necessário para os microrganismos aeróbios, pode ser inserido de forma mecânica - agitação única e formação de bolhas - ou por ar difuso, entradas diversas no fundo do tanque (LIMA, 2005).

Figura 1 - Esquema do processo de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados



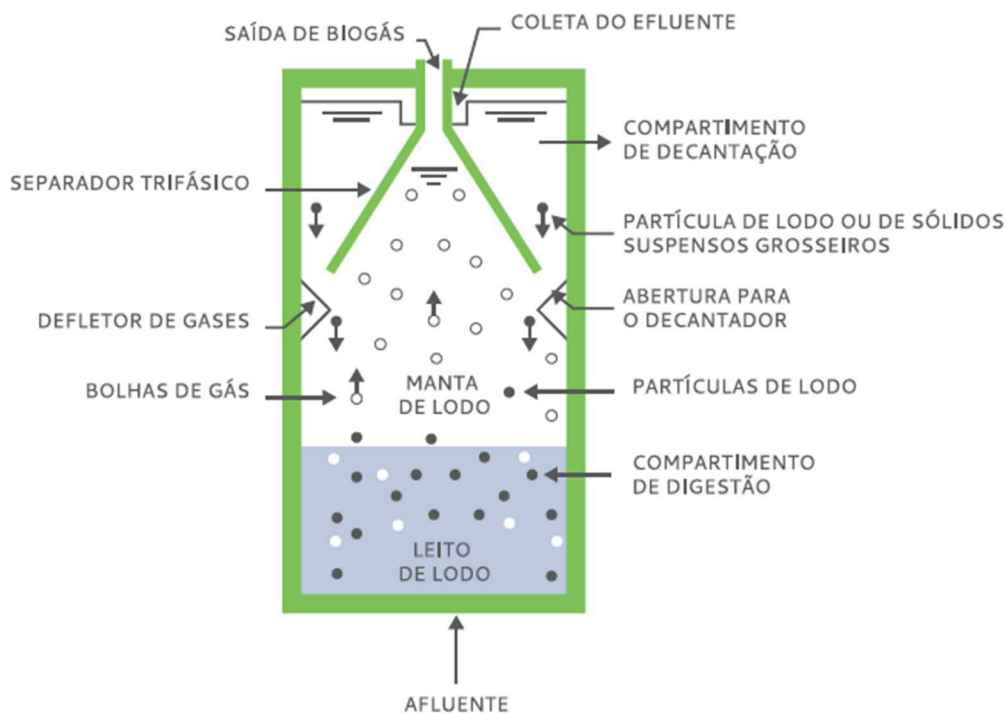
Fonte: PEROVANO; FORMIGONI, 2011

Biofiltros aeróbios, que se baseiam na imobilização dos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica em materiais suportes (pedras, materiais sintéticos como plásticos, etc.) são utilizados devido à sua robustez e elevada qualidade do efluente com respeito à remoção de matéria orgânica. Também nessa alternativa tecnológica, os microrganismos são retidos no reator mais tempo que o esgoto, caracterizando a desvinculação do tempo de retenção hidráulica do celular. Como desvantagem dessa alternativa está o requerimento de estrutura e volume para acomodar o material suporte, além da possibilidade de colmatação do leito (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

Os reatores aeróbios com biofilmes removem a matéria orgânica por biomassa aderida originando um suporte, denominado biofilme, sendo de leito fixo ou móvel. Esta opção é mais compacta uma vez que o mesmo volume de reator é capaz de manter uma carga mais elevada de microrganismos ativos e, assim, receber maior carga orgânica para tratamento; quando comparado com volume de reator que não tem lodo retido anteriormente em decantador primário. Assim como lodos ativados, há necessidade de tratamento do lodo gerado para sua disposição final correta.

Dentre os tipos de reatores anaeróbios, destaca-se o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, em português, Reator de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente). A nomenclatura está relacionada ao fluxo ascendente e à forma de auto aderência do lodo no interior do reator em que as bactérias e as arqueias metanogênicas associam-se formando aglomerados maiores, originando uma manta no fundo. O bom funcionamento do processo está associado à capacidade de sedimentabilidade do lodo na unidade, desvinculando o TDH (Tempo de Detenção Hidráulica) do TDC (Tempo de Detenção Celular). O sistema separador trifásico permite separar o lodo do efluente tratado e do biogás gerado. O reator UASB é conhecido também como RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e DAFA Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente). É um sistema compacto, que permite eficiências de remoção de matéria orgânica do esgoto de até 80%, na ausência de oxigênio (JORDÃO E PESSÔA, 2011). Representa economia energética em relação aos sistemas aeróbios não somente por dispensar a aeração, mas também por gerar biogás com elevado conteúdo energético.

Figura 2 - Esquema de funcionamento e fluxos do reator UASB



Fonte: SCHUHMANN; RAABE, 2014.

De operação simples e econômica, o reator UASB tornou-se uma tecnologia mais disseminada pelo Brasil a partir da década de 90, com incentivos do governo tanto para pesquisas como para projetos. Dentre os estados em destaque com a tecnologia estão Minas Gerais, São Paulo e Paraná. No último, a tecnologia UASB é bem difundida uma vez que a concessionária SANEPAR definiu o processo como padrão para suas estações. (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Em relação ao consumo de energia entre os sistemas de tratamento aeróbio e anaeróbio, há grande distinção no balanço energético, como exemplificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação entre o balanço energético de processos aeróbio e anaeróbio de tratamento de efluentes<sup>1</sup> (valores em kJ/d)

Balanço energético do processo	Aeróbio	Anaeróbio
Aeração <sup>2</sup>	- 1,9 x 10 <sup>6</sup>	-
Produção de metano <sup>3</sup>	-	12,5 x 10 <sup>6</sup>
Aquecimento do efluente a 30°C	-	-4,2 x 10 <sup>6</sup>
Balanço final	- 1,9 x 10 <sup>6</sup>	8,3 x 10 <sup>6</sup>

<sup>1</sup> - Características dos efluentes: vazão de 100 m<sup>3</sup>/d, concentração de matéria orgânica de 10 kg/m<sup>3</sup> e temperatura de 20°C;

<sup>2</sup> - Eficiência de aeração: 1,52 kg O<sub>2</sub>/kWh;

<sup>3</sup> - Produção de metano: 0,35 m<sup>3</sup>/kg DQO removida

Fonte: METCALF & EDDY, 2003.

## 2.2 Biogás

### 2.2.1 Histórico

Também conhecido como “gás dos pântanos”, o biogás tem sua produção observada desde tempos remotos do planeta em locais como pântanos, lagos hipereutrofizados e sedimentos do fundo de ambientes aquáticos. Naturais, úmidos e com ausência de oxigênio, estes ambientes proporcionam condições ótimas para o desenvolvimento de microrganismos anaeróbios decompositores de matéria orgânica.

A combustão natural ocorrida na superfície das regiões pantanosas mostrou aos estudiosos a possibilidade da produção de um gás combustível a partir da decomposição de resíduos orgânicos. (GRYSCHEK e BELO, 1983).

Na descrição de Massotti (2009), é um gás natural inflamável, resultado da fermentação anaeróbia de dejetos de animais, resíduos vegetais e de lixo industrial ou residencial em condições adequadas de umidade. A pureza do biogás é analisada por meio da presença de metano, sendo que quanto maior sua proporção, maior é considerada a sua pureza. Sendo composto basicamente por metano – que representa de 60 a 80% da mistura e gás carbônico, o biogás possui outros gases em sua composição, entretanto em proporções menores. Entre esses, destaca-se o gás sulfídrico que pode alcançar 1,5%. Esse gás apresenta efeito corrosivo, devendo ser removido da corrente gasosa anteriormente à utilização do biogás.

De acordo com Zachow (2000), a proporção dos gases na mistura depende de diversos fatores, como o tipo do digestor e do substrato a ser digerido. Entretanto, o biogás é composto essencialmente por metano e dióxido de carbono, e tem seu poder calorífico diretamente ligado à quantidade de metano.

O futuro promissor dos diversos usos do biogás já era enxergado desde a década de 80, como relatado por Teixeira (1985), que o chamava de gás de esgoto, Klar gás, March gás, RDF (combustível derivado de refugo), gás de lodo, fogo dos tolos, Gobar gás (gás de esterco bovino), bioenergia e combustível do futuro. O autor também destacou que a presença de sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) pode conferir ao biogás um odor característico de ovo podre.

Nas décadas de 50 e 60, a Índia e a China foram os primeiros países a explorarem a capacidade energética do processo de biodigestão de resíduos sólidos e lodos, desenvolvendo seus próprios modelos de biodigestores, assim como outros países subdesenvolvidos. A difusão para vários países foi grandemente impulsionada pela crise do petróleo, quando foi

necessária a busca por alternativas de combustíveis. Entretanto, o impulso não chegou a constituir um sólido movimento de substituição dos recursos não renováveis por fontes alternativas. As soluções encontradas para os problemas de desenvolvimento não se mostravam padrões, necessitando ser adaptadas às necessidades, recursos e cultura de cada novo país. (NOGUEIRA, 1986)

No Brasil, com a crise do petróleo da década de 70, a tecnologia da digestão anaeróbia chegava ao país. Programas governamentais costumavam incentivar a instalação de biodigestores em propriedades agrícolas, principalmente da região nordeste, focados na geração de energia e produção de biofertilizante, diminuindo a dependência da energia térmica e aquisição de adubos químicos. Além disso, a utilização da biodigestão dos dejetos dos animais diminui os impactos ambientais das atividades e aumentava a renda dos criadores. Com os resultados esperados não sendo alcançados, a maioria dos sistemas implantados foi desativada. (ICLEI, 2009).

No final dos anos 90, o chamado “mercado da energia verde” foi constituído, firmando compromisso com a redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e, conseqüentemente, favorecendo a implementação de geração de energia através de fontes renováveis. Sendo assim, no Brasil, os projetos que “capturam” CO<sub>2</sub>, ou seja, reduzem as emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE), podem participar como vendedores de certificados de crédito de carbono no mercado internacional de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) (Atlas de energia elétrica do Brasil, 2008).

A utilização de biogás produzido a partir de sistemas de tratamento de efluentes líquidos é uma proposta recente, principalmente para efluentes diluídos, ou seja, de baixa concentração, como o esgoto sanitário. Além do reduzido potencial de geração por volume de esgoto tratado, a dissolução de parcela do biogás na corrente líquida efluente desencoraja a sua utilização em ETEs de pequena escala. O aproveitamento do biogás a partir do tratamento anaeróbio de esgoto sanitário requer economia de escala, ou seja, uma população mínima que justifique a instalação de equipamentos para purificação e utilização do biogás gerado (CHERNICHARO, 2007).

### 2.2.2 Processo de formação do biogás: biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia representa um ecossistema equilibrado devido à interação de diferentes populações de microrganismos com funções específicas para degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio. A fermentação natural, composta por uma sequência de

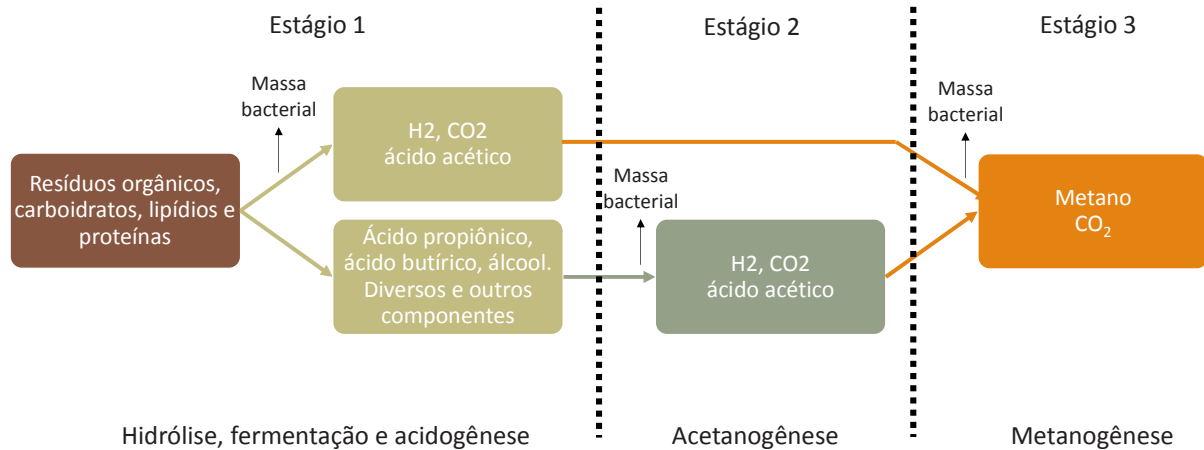
processos fisiológicos de micro metabolismos, pode ser dividida em duas principais etapas. A primeira é a transformação de compostos mais complexos em sólidos suspensos voláteis, compostos de hidrogênio e dióxido de carbono por bactérias facultativas e anaeróbias. A segunda é a geração de uma mistura gasosa, constituída basicamente de metano e dióxido de carbono por microrganismos metanogênicos (CAMPOS et al, 1999).

As etapas da biodigestão dividem-se de forma mais específica, conforme as atividades metabólicas, segundo CAMPOS et al (1999):

- Hidrólise: material particulado ou polímeros são hidrolisados em moléculas menores que possam ser absorvidas pela membrana celular das bactérias fermentadoras. As exo-enzimas liberadas por elas são responsáveis pela conversão em material dissolvido. Em seguida, ações metabólicas originam ácidos voláteis, álcoois, ácido láctico, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio, novas células bacterianas, dentre outros.
- Acidogênese: conversão de açúcares e aminoácidos em ácidos orgânicos por bactérias fermentativas de diversas espécies. As mais usuais são do grupo Clostrida e da família Bacteroidaceaea.
- Acetogênese: oxidação dos produtos da acidogênese em substrato mais apropriado para as bactérias metanogênicas. Os compostos resultantes são hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético. Na formação dos ácidos propiônicos e butírico, há desvio da rota para acomodação do hidrogênio gerado. Uma vez que esses ácidos não são utilizados pelas arqueias metanogênicas, ocorre o acúmulo dos ácidos prejudicando o funcionamento do reator. Acetato e hidrogênio são diretamente consumidos na metanogênese.
- Metanogênese: esses microrganismos do grupo Archaea ou “Archaeobacteria” apresentam afinidades específicas com certos substratos como ácido acético, hidrogênio, monóxido de carbono, metanol, dióxido de carbono e ácido fórmico. Existem dois grupos dessas bactérias dependendo do substrato consumido: um produz metano pelo ácido acético ou metanol (acetoclásticas) e, outro produz o mesmo gás por hidrogênio e dióxido de carbono (hidrogenotróficas). As bactérias acetoclásticas são responsáveis por 60% a 70% de toda a produção de metano.

As etapas da biodigestão foram retratadas em forma de fluxograma, como na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma das etapas da biodigestão anaeróbia



Fonte: PRATI, 2010

O processamento de matéria prima ocorre sob condições específicas do meio cujas variações podem ocasionar baixa produção de biogás (MAO et al, 2015). Tal sensibilidade às mudanças nas condições ambientais é considerada uma desvantagem da biodigestão anaeróbia que depende mais de mecanismos reguladores intrínsecos do que de controladores externos, dificultando a operação e eficiência do processo. Mecanismos auto reguladores decorrem das interações dos diversos grupos de bactérias visto que todas têm participação no controle e ajuste do pH e potencial redox do meio com o objetivo de otimizar a metanogênese (FORESTI et al, 2006). A compreensão do processo de formação do biogás e suas variantes é essencial para a aplicação eficiente da tecnologia de aproveitamento desta matéria prima. Sua composição e características devem ser avaliadas como variáveis complementares da sua utilização uma vez que podem prejudicar ou até inviabilizar a conversão final, seja em energia elétrica ou combustível.

Segundo Chernicharo (1999), outras desvantagens da biodigestão anaeróbia de esgoto sanitário são a possibilidade de produção de mau odores; baixa eficácia na remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos e necessidade de pré-tratamento em estações sanitárias. Por outro lado, as vantagens são menor produção de lodo que processos aeróbios (FORESTI et al, 2006), balanço energético mais favorável de forma a reduzir custos operacionais, baixa demanda por área, produção de metano – gás combustível de alto poder calorífico -, adaptabilidade a elevadas cargas orgânicas e aplicável a projetos de grande e pequena escala.

É necessário manter equilíbrio entre grupos de bactérias para eficiência do processo todo. As concentrações de ácido orgânicos e de alcalinidade a bicarbonato são utilizados para observação do controle da digestão anaeróbia. Os compostos principais da fermentação da matéria-orgânica são os ácidos de cadeia curta. As condições do meio e a quantidade de bactérias metanogênicas devem estar adequadas para que o consumo desses ácidos intermediários ocorra na taxa esperada, sem ocasionar seu acúmulo.

Os requisitos para manutenção do equilíbrio do ecossistema anaeróbio são variados, incluindo características químicas e físicas que afetam diretamente o crescimento microbiano. Fatores físicos ideais devem ser conhecidos e controlados, porém não são considerados limitantes como outros químicos – temperatura, pH, concentração de nutrientes. As concentrações de carbono, nitrogênio fosforo e enxofre – são determinantes para ocorrência dos processos biológicos envolvidos (CAMPOS et al, 1999). Especificamente sobre a composição nutricional do meio, usualmente consideram-se ideais, valores de substâncias que mais se assemelham à composição química das células microbiológicas. Tais nutrientes inorgânicos devem estar em concentrações apropriadas para o crescimento celular e garantia da eficiência de tratamento biológico do esgoto. Em casos de carência ou excesso, pode ser aplicada menor carga de material no tratamento ou a eficiência do mesmo pode ser reduzida. O esgoto doméstico, na maioria das vezes, apresenta concentrações adequadas de todos os nutrientes. Raramente, limitações ocorrem devido à disponibilidade de ferro que pode restringir a atividade metanogênica. Tais bactérias carecem dos seguintes elementos, em ordem crescente de relevância: vitamina B12, riboflavina, selênio, molibdênio, níquel, cobalto, ferro, fósforo, enxofre e nitrogênio (CHERNICHARO, 2007).

O principal fator físico de influência no processo de digestão é a temperatura, cujo controle no interior da célula depende do valor externo (CAMPOS et al, 1999). A temperatura em um reator tem influência direta na termodinâmica das reações químicas, por exemplo, no nível de dissociação de certos compostos, ou seja, na ativação de certas reações. Trabalha-se, com frequência, estudando o comportamento das espécies bacterianas dentro de três faixas:

- psicofílica (entre 4°C e 15°C);
- mesofílica (entre 20°C e 40°C);
- termofílica (acima de 45°C).

A maioria dos organismos anaeróbios do processo de digestão trabalham idealmente na faixa mesofílica, porém são capazes de se adaptar à termofílica. Entretanto, muitos resultados

nesta faixa são incertos e originam novos questionamentos, por exemplo, entender se os benefícios específicos da temperatura mais elevada compensam as desvantagens: maior gasto de energia para aquecimento, instabilidade do processo e baixa qualidade do sobrenadante. Estudos com diversos cenários de temperatura tornam-se relevantes para projetos de estações de tratamento uma vez que a operação na temperatura ideal propicia a redução do volume do reator. Os parâmetros essenciais do processo biológico que podem ser alterados pela mudança de temperatura são a velocidade de reações enzimáticas e a velocidade de difusão do substrato (CHERNICHARO, 2007).

Quanto aos fatores químicos, acompanha-se o pH, alcalinidade e concentração de ácidos voláteis. O pH é essencial para a atividade enzimática uma vez que altera a estrutura proteica das mesmas. Além disso, alterações no valor do pH afetam a toxicidade do meio, em função do equilíbrio das espécies de substâncias presentes. Para microrganismos responsáveis pela produção de metano, o crescimento ótimo ocorre entre 6,6 e 7,4. Mesmo assim, conseguem trabalhar numa faixa mais ampla de pH, entre 6,0 e 8,0. Fora deste intervalo, estudos já demonstraram que o crescimento pode ser inibido. Já para bactérias produtoras de ácidos, valores menores são mais apropriados – entre 5,0 e 6,0 -, atingindo produtividade até mesmo abaixo de pH 4,5 (CHERNICHARO, 2007).

A capacidade tampão é uma característica muito importante em reatores por adequar o meio para manutenção do pH constante. Uma solução com tal capacidade é constituída por um ácido fraco e o respectivo sal de maneira a incentivar a associação dos íons  $H^+$  e  $OH^-$ . O ácido carbônico e ácidos voláteis, principalmente, afetam o pH na digestão anaeróbia. A relação entre concentração de dióxido de carbono e alcalinidade determina a capacidade tampão. Basicamente a alcalinidade deve ser mantida em equilíbrio com os ácidos voláteis no meio reagente (CHERNICHARO, 2007).

### 2.2.3 Caracterização dos gases do biogás

As condições mínimas para garantir eficiência desejada na geração de eletricidade pelo biogás são continuidade do processo de tratamento de esgoto e, respectiva, conversão do combustível em energia; tempo de detenção hidráulica do tratamento para estimar média de biogás diária produzida pelas arqueias; características físico-químicas do gás como composição, pressão, umidade, temperatura, poder calorífico (COSTA, 2006).

O biogás é uma mistura gasosa combustível, normalmente incolor, inodoro e com baixa solubilidade em água. Outros fatores que influenciam a qualidade do biogás para

aproveitamento energético são a concentração de metano, presença de gases inertes e ácidos. A composição do biogás é função direta da proporção de matéria orgânica presente no esgoto. A Tabela 3 informa os valores médios obtidos na análise da composição da mistura:

Tabela 3 - Composição do Biogás

<b>Gás</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Concentração no Biogás</b>
Metano	CH <sub>4</sub>	50 a 80%
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	20 a 40%
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	1 a 3%
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	0,5 a 3,0%
Gás sulfídrico e outros	H <sub>2</sub> S, CO, NH <sub>3</sub>	1 a 5%

Fonte: La Farge (1979) Apud Coldebella (2006)

O gás metano, presente majoritariamente no biogás, é cerca de 21 vezes mais poluente que o CO<sub>2</sub>, contribuindo para o efeito estufa e, conseqüentemente, o aquecimento global, portanto, se liberado diretamente na atmosfera, ele causa grande prejuízo ambiental. Desta forma o aproveitamento energético é muito interessante, uma vez que concilia a geração de energia renovável com a questão ambiental, minimizando os danos causados pelos gases de exaustão. (GODOY JÚNIOR et al., 2004; OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006).

Na mistura, a presença de ácidos, contaminantes e gases inertes pode reduzir o poder calorífico do combustível cujo valor, quando purificado, é próximo ao do gás natural - 8.554,0 kcal/kg. Deve-se avaliar, também, a concentração de poluentes formados após a combustão como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, entre outros (COSTA, 2006). A Tabela 4 mostra a variação do poder calorífico e peso específico de acordo com as diferentes faixas de composição do biogás.

Tabela 4 - Variação do poder calorífico conforme composição do biogás

<b>Composição Química</b>	<b>Peso Específico (kg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)</b>
10% CH <sub>4</sub> , 90% CO <sub>2</sub>	1,8393	465,43
40% CH <sub>4</sub> , 60% CO <sub>2</sub>	1,4643	2338,52
60% CH <sub>4</sub> , 40% CO <sub>2</sub>	1,2143	4229,98
65% CH <sub>4</sub> , 35% CO <sub>2</sub>	1,1518	4831,14
75% CH <sub>4</sub> , 25% CO <sub>2</sub>	1,0268	6253,01
95% CH <sub>4</sub> , 5% CO <sub>2</sub>	0,7768	10.469,60
99% CH <sub>4</sub> , 1% CO <sub>2</sub>	0,768	11.661,02

Fonte: Avellar (2001) apud Zilotti (2012)

O gás sulfídrico, incolor, mais denso que o ar, característico pelo cheiro de ovo podre, é altamente tóxico, atuante sobre o sistema nervoso e causando irritação nos olhos e vias respiratórias. (ZILOTTI, 2012).

Segundo a Portaria 104/2002 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o ácido sulfídrico na presença de oxigênio pode causar corrosão em aços, podendo ser nocivo aos sistemas de transporte, motores e equipamentos de beneficiamento do biogás.

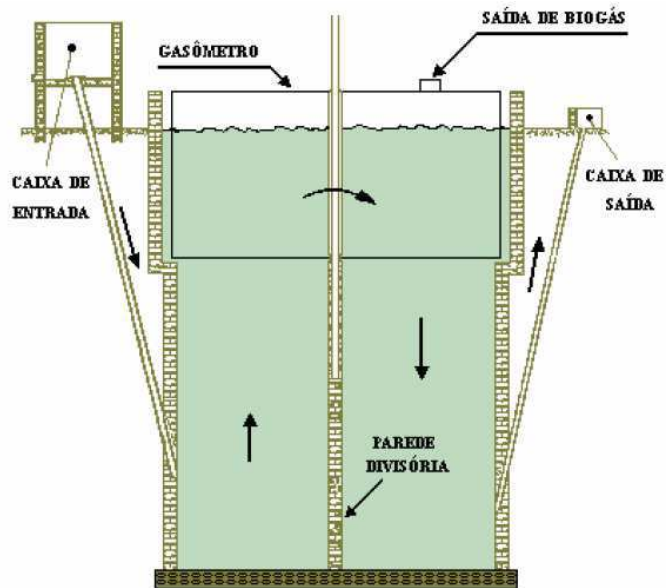
Desta forma, a utilização do biogás normalmente exige pré-tratamentos de purificação da mistura, seja para retirada de H<sub>2</sub>S, água, dióxido de carbono e/ou partículas. O grau de eficiência da purificação é determinado de acordo com cada uso e cada equipamento utilizado para os diversos tipos de aplicações. Entretanto, segundo Frare (2006), mesmo presente em um pequeno percentual no biogás, o gás sulfídrico demanda uma especial atenção, buscando a garantia da segurança do sistema e o aumento da vida útil dos equipamentos.

#### 2.2.4 Sistemas de produção de biogás

A produção de biogás a partir de matriz orgânica tem sido utilizada há muito tempo, como citado anteriormente. Os reatores utilizados com esse fim são chamados biodigestores e podem ser classificados conforme a origem e fluxo de formação de gás: por batelada ou contínuo. Esta última categoria contempla os principais modelos utilizados no Brasil: indiano, chinês (ZILOTTI, 2012). A transposição para a utilização em sistemas de tratamento de esgoto sanitário e demais águas residuárias, tratadas em reatores UASB, pode ser feita com reservas, uma vez que o lodo de esgoto gerado e, principalmente, as águas residuárias constituem-se em matrizes orgânicas, porém muito diluídas, quando comparada às matrizes de resíduos sólidos.

O reator projetado na Índia em 1937 é composto por uma câmara de digestão revestida por redoma móvel e resistente, formando o gasômetro, como o modelo da Figura 4. Tal mobilidade permite que o tanque de biogás mantenha pressão constante ao expandir e diminuir conforme o volume de gás interno. As perdas de gás neste processo são reduzidas porque o gasômetro está sobre o substrato ou selo hídrico (OLIVEIRA, 2009).

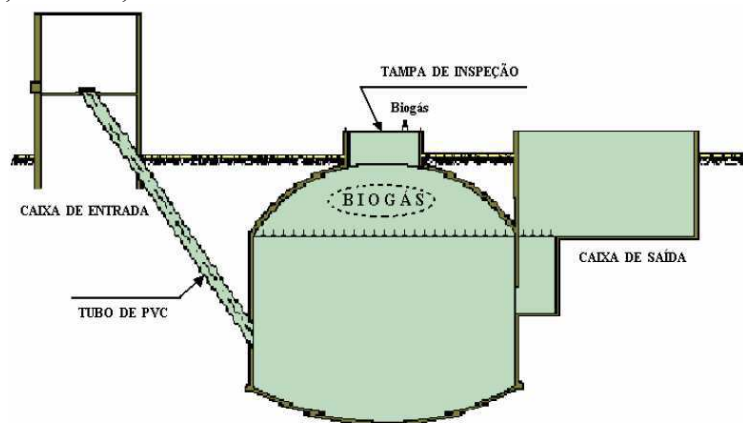
Figura 4 - Vista frontal, em corte, do reator anaeróbio modelo indiano



Fonte: PECORA, 2006

Já a versão chinesa de 1936 constitui-se em uma câmara cilíndrica de alvenaria, sendo fixa e com menor custo de instalação e manutenção, como representada na Figura 5. Nesta câmara ocorre a fermentação, normalmente a altas pressões, mantidas pelo princípio de prensa hidráulica. Isso significa que o aumento de pressão no interior, devido ao acúmulo de biogás, ocasionará desvio do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário, se houver decompressão no interior da câmara (OLIVEIRA, 2009).

Figura 5 - Vista frontal, em corte, do reator anaeróbio modelo chinês.



Fonte: PECORA, 2006

Os modelos indiano e chinês apresentam pequenas diferenças como naquele a cúpula ser móvel e de metal, fibra de vidro, plástico resistente ou outro material. No caso do reator chinês, é determinada cúpula fixa de alvenaria. Ademais, o modelo indiano tem sistema mais

eficiente contra a fuga do gás e, assim, um maior volume de combustível para futura geração de energia (OLIVEIRA, 2009).

Em relação aos reatores por batelada, Oliveira (2009) afirma que a produção de gás é intermitente e longa, dividida nas etapas de alimentação da matéria orgânica, espera da fermentação, armazenamento do gás e limpeza final para reiniciar a sequência. A câmara pode ser de alvenaria, concreto ou aço para que seja fechada durante o processo biológico, permitindo apenas uma saída de gás (OLIVEIRA, 2009).

Na presente pesquisa será explorado o potencial energético gerado em reatores anaeróbios tipo UASB utilizados no tratamento de esgoto sanitário. O biogás gerado em biodigestores utilizados em ETEs que utilizam sistemas aeróbios também será contemplado para eventuais comparações.

#### 2.2.5 Geração de energia elétrica

Sendo uma mistura de diferentes gases, o biogás produzido necessita de uma purificação antes de ser aplicado em seus diversos usos. Para a utilização em um sistema de conversão em energia elétrica não é diferente.

O sistema de purificação do biogás normalmente é instalado na linha de captação do biogás e é composto por duas etapas responsáveis pela retirada do gás sulfídrico. Antes de seguir para os compartimentos de purificação, o biogás passa por uma tubulação a qual retém a água, condensando-a em suas paredes.

Já com uma menor taxa de umidade, o biogás segue para o primeiro compartimento, composto por sílica gel azul, a qual também serve como indicador de saturação do sistema com a mudança de cor. O segundo compartimento possui cavaco de ferro, responsável por garantir a retirada do  $H_2S$  que não reagiu anteriormente com a sílica.

Segundo Balestieri (2002), as tecnologias de geração e cogeração – a geração combinada de eletricidade e calor a partir de uma mesma fonte primária de energia – estão bem desenvolvidas e suficientemente comprovadas, com a utilização de diversos combustíveis, diferentes configurações de sistemas disponíveis e para ampla gama de potência gerada.

Segundo Pecora (2006), “entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás a energia química em suas

moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada”. A conversão da energia mecânica em energia elétrica é realizada pela utilização de um gerador no final do processo.

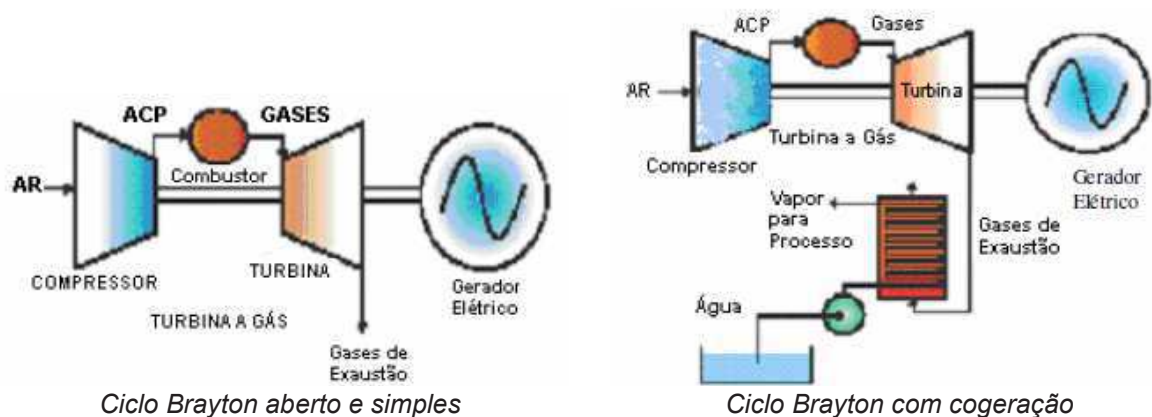
Tecnologias promissoras para aproveitamento energético, como as células de combustível, foram desenvolvidas ao longo do tempo, entretanto as turbinas a gás, microturbinas e motores de combustão interna do tipo ciclo Otto são as mais utilizadas para a conversão energética do biogás. Além disso, este combustível também pode ser utilizado na queima direta em caldeiras para a cogeração. (PECORA, 2006)

### 2.2.5.1 Turbinas a gás – ciclo Brayton

Sendo cada vez mais requisitado para a geração de energia, nas turbinas de ciclo Brayton o ar atmosférico é constantemente succionado pelo compressor e, em elevada pressão, entra na câmara de combustão, onde é misturado com o combustível. Após a combustão, gases com altas temperaturas são gerados, se expandindo pela turbina e transformando sua energia térmica em energia mecânica, e parte dessa energia é utilizada para acionar o compressor. Ainda segundo Pecora (2006), o rendimento do ciclo Brayton é de aproximadamente 35%, podendo ser encontradas no mercado turbinas com até 41,9%.

Os gases provenientes da combustão, além de acionarem a turbina, também se descarregam na atmosfera, os quais podem ser aproveitados para cogeração de aquecimento de água para produção de vapor para utilização na produção. A Figura 6 mostra os dois esquemas de turbina ciclo Brayton.

Figura 6 - Esquemas de turbinas Ciclo Brayton



Fonte: SERVICE ENERGY (2005) apud PECORA (2006).

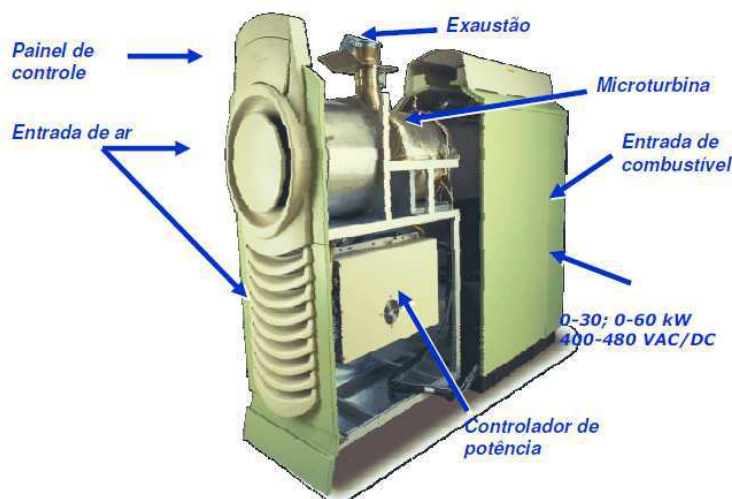
Além de possuírem fácil manutenção e controle, as turbinas a gás dispensam a utilização de fluido de trabalho intermediário, uma vez que são acionadas pelos próprios gases quentes produzidos no processo de combustão, tornando-as mais compactas e viabilizando a utilização de diferentes tipos de combustíveis, como gás natural e querosene. As principais características necessárias para que os combustíveis gasosos possam ser utilizados nesse tipo de equipamento são a não produção de cinzas na combustão – as quais podem comprometer a operação do sistema devido ao acúmulo nas paletas das turbinas; não conter compostos corrosivos (FRANÇA JUNIOR, 2008).

#### 2.2.5.2 Microturbina a gás

O termo “microturbina” refere-se a um sistema de dimensões reduzidas, que opera na faixa de 20 a 250 kW, em elevadas velocidades de rotação e com diversos tipos de combustíveis, como gás natural, biogás, GLP, querosene, entre outros. Para potências situadas entre 250 e 1.000 KW, a denominação usual é de miniturbina.

Nas microturbinas o ar é aspirado com força para o interior da turbina a alta velocidade e pressão. Misturado ao combustível e queimado na câmara de combustão, o ar comprimido gera gases em altas temperaturas, sofre expansão nas palhetas da turbina, produzindo trabalho. O processo de queima é controlado para se obter a máxima eficiência e minimizar os níveis de emissão, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Componentes do sistema da microturbina



Fonte: MONTEIRO (2004) apud PECORA (2006).

A maioria das microturbinas existentes no mercado tem como função principal produzir eletricidade, podendo funcionar em cogeração utilizando equipamento adicional. As modernas microturbinas a gás representam uma tecnologia de ponta extremamente apropriada à micro

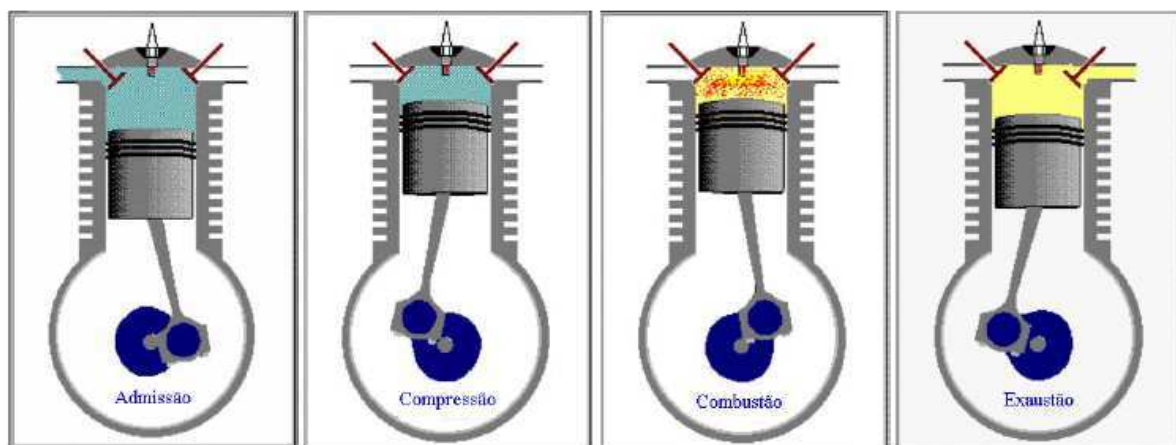
cogeração, operando com ciclo Brayton, ou seja, utilizando o mesmo princípio de funcionamento das turbinas a gás de maior porte. Este tipo de cogeração permite reduzir consideravelmente o consumo de energia primária, em comparação à geração típica de calor e eletricidade.

### 2.2.5.3 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna são máquinas que transformam a energia térmica de um combustível líquido ou gasoso em energia mecânica por meio do acionamento de pistões confinados em cilindros. O aproveitamento do calor ocorre com a utilização da energia contida nos gases de exaustão e/ou nos fluidos de refrigeração e lubrificação. A quantidade de calor recuperada depende do tipo e porte do motor e de seu regime operacional. O calor que precisa ser rejeitado dos óleos lubrificantes e do fluido de refrigeração é limitado à produção de água quente. Já os gases de escape podem ser aproveitados diretamente ou serem conduzidos à caldeira de recuperação para gerar vapor. Esses motores são divididos em dois tipos de ciclos: Otto e Diesel.

Os motores de combustão interna podem utilizar combustíveis gasosos (gás natural, propano, butano, biogás, gás de síntese, nafta química, entre outros), líquidos (álcool, gasolina, Diesel, Biodiesel, entre outros) e ainda misturas de combustíveis gasosos com líquidos em proporções que permitam a autoignição. O ciclo Otto, representado na Figura 8, é mais recomendável quando o combustível escolhido é gasoso e, nestes casos, a mistura do gás com o ar segue determinadas proporções e uma pressão e temperatura pré-estabelecidas. No entanto, pode-se utilizar o gás em equipamentos de ciclo Diesel desde que o combustível inserido na câmara de combustão seja uma mistura de gás com 3 a 5 % de diesel. Estes equipamentos são conhecidos como *bi-fuel* ou *dual-fuel*, em função do modo em que são executadas as misturas de combustíveis. Nestes sistemas, é necessário recorrer ao uso de compressores de elevada potência, de modo a criar as elevadas pressões de gás necessárias à injeção deste nas câmaras/cilindros de combustão.

Figura 8 - Esquema do funcionamento de um motor ciclo Otto



Fonte: BERTULANI (2002) apud PECORA (2006).

Tabela 5 - Comparação entre as tecnologias de conversão energética de biogás

<b>Tecnologia de Conversão</b>	<b>Potência Instalada (kW)</b>	<b>Rendimento Elétrico (%)</b>	<b>Emissões de NO<sub>x</sub> (ppm)</b>
Turbina a gás	500 a 150.000	20 a 30%	35 a 50
Microturbinas	30 a 100	24 a 28%	< 9
Motores Ciclo Otto	30 a 20.000	30 a 34%	250 a 3.000

Fonte: PECORA (2006)

Conforme resumido na Tabela 5, para o aproveitamento energético do biogás, os motores apresentam maiores eficiências e as turbinas a gás possuem maior eficiência global de conversão, quando operadas em cogeração.

### 2.2.6 Aspectos econômicos e ambientais

O consumo de energia elétrica nas estações de tratamento de esgoto varia muito devido ao tipo de tratamento utilizado no sistema. Além de equipamentos elétricos de automação, a energia elétrica é necessária para operações como bombeamento, transporte de lodo para recirculação e aeração. Essa última é responsável pelo maior consumo dentro das ETEs, sendo a maior diferença entre as necessidades das estações aeróbias e anaeróbias (LIMA, 2005).

O aproveitamento energético do biogás não traz benefícios apenas financeiros, como a economia do consumo de energia da rede de distribuição. Para o meio ambiente são visíveis benefícios como a redução de gases do efeito estufa, geração de energia renovável e aproveitamento de rejeitos orgânicos. Outro benefício ambiental dessa utilização da matéria

orgânica é a prevenção de casos de eutrofização e acidificação, poluição atmosférica, proliferação de patógenos e conservação vegetal (MAO et al, 2015).

De acordo com França Junior (2008), os custos operacionais para a produção de biogás numa planta RALF/UASB, de médio porte, situam-se entre US\$ 0,03/m<sup>3</sup> e US\$ 0,05/m<sup>3</sup>. Para plantas de grande porte esses custos podem baixar para cerca de US\$ 0,02/m<sup>3</sup>.

Sendo a aplicação mais comumente utilizada nas estações de tratamento e aterros sanitários, o biogás é desprezado e queimado em “flares”, buscando a minimização dos impactos ambientais, porém a emissão de CO<sub>2</sub> no processo continua contribuindo para o efeito estufa. Segundo Coelho et al. (2006), este é o primeiro fator a ser considerado na análise econômica do sistema de geração de energia, afinal o biogás, que é um produto dos processos anaeróbios, quando queimado, é o desperdício de uma possível fonte de renda.

Segundo Pecora (2006), além das vantagens econômicas e ambientais, o aproveitamento energético do biogás traz benefícios para a sociedade, pois promove a utilização e reaproveitamento de recursos “descartáveis” e/ou de baixo custo; colabora para a não dependência das fontes de energia fóssil, aumentando a variedade de combustíveis e a oferta de energia; possibilita a geração descentralizada de energia, geração de novos empregos; diminui os odores e as toxinas lançadas no ar; e aumenta a viabilidade do saneamento básico no país, permitindo o desenvolvimento tecnológico de empresas de saneamento e energéticas.

Entretanto, conforme concluído por Lima e Passamani (2012), é necessário que seja feita uma caracterização quali-quantitativa do biogás para calcular a energia disponível em cada caso. Parâmetros como o teor de metano e carga de DQO no efluente da ETE são essenciais para a compreensão da viabilidade do sistema de aproveitamento energético. Além disso, a taxa de perda de metano e a vazão de efluente tratado pode inviabilizar a geração de energia devido à baixa geração de biogás, tornando prazo de retorno do investimento financeiro muito alto. Todavia, em casos que o montante de energia gerada não seja suficiente para a utilização do biogás para geração de energia, ainda deve-se analisar o aproveitamento térmico do combustível.

### 2.3 Mercado de energia

O setor elétrico possui grande importância para o crescimento econômico brasileiro. Por isso, decisões de mudanças vêm sendo tomadas inspiradas na experiência internacional e

controladas por políticas regulatórias de maneira a produzir um ambiente competitivo na geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia. (FERNANDEZ, 2010)

Nos últimos 25 anos, em todo o mundo é vista a reestruturação, desverticalização e desregulamentação do setor elétrico, acompanhado do aumento da volatilidade dos preços da energia, ou seja, a possibilidade de grandes variações em curto espaço de tempo. (DENG & XU, 2009)

Segundo Mayo (2012), até o início dos anos 1990, praticamente todos os segmentos do setor elétrico brasileiro eram de propriedade pública, caracterizando um modelo centralizado estatal que clamava por uma reforma institucional, visto que era perceptível que o Estado estava próximo ao esgotamento de seus recursos para investimento na infraestrutura para atender à crescente demanda. Desta maneira, a reforma teve seu início objetivando assegurar, basicamente, 2 pontos: os investimentos necessários para a expansão da oferta de energia e a garantia de que o setor fosse economicamente eficiente.

As mudanças no setor elétrico começaram com a Lei 8.631, em 1993, com a extinção da equalização tarifária, a qual garantia que, independentemente do local de consumo e condições para entrega, a tarifa era a mesma em todo o território nacional. Seguindo no processo de reestruturação, a Lei 9.074 de 1995 abre o mercado de energia para novos produtores, aumentando a competitividade por meio de novas classes de agentes:

- Produtor Independente de Energia Elétrica (PIE): pessoa jurídica que recebe concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida por sua conta e risco;
- Consumidor Livre: consumidores que podem optar por contratar seu fornecimento de energia elétrica no todo, ou em parte, com PIE.

Ainda nos anos 90, seguindo os planos de reforma, em 1996 foi implantado o “Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro”, que teve a finalidade de desverticalizar as empresas, dividindo-as em 3 segmentos: Geração, Transmissão e Distribuição (FERNANDEZ, 2010). Com isso, viu-se a necessidade da criação de uma agência reguladora autônoma, surgindo assim a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, responsável por “regular a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica; fiscalizar as concessões, permissões e os serviços de energia elétrica; estabelecer tarifas; dirimir as divergências entre os agentes; e promover as atividades de outorga de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica”. (ANEEL)

Segundo Mayo (2012), o modelo regulatório, concebido dentro de uma perspectiva de privatização generalizada, acabou não sendo totalmente implementado, principalmente no que se refere à privatização das geradoras estatais - as quais até os dias atuais, em sua maioria, ainda permanecem sob controle do Estado.

Em 2003, iniciou-se um segundo processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro, com a introdução de importantes alterações, as quais seguem como pilares do atual setor elétrico brasileiro. Dentre as novidades, encontra-se a criação de instituições como a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), responsável pelo planejamento do setor elétrico de longo prazo, e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), responsável pelas atividades relacionadas à comercialização de energia elétrica no sistema interligado nacional.

Nesse novo, e ainda atual, modelo, a comercialização é realizada em dois ambientes de mercado distintos:

- Ambiente de Contratação Regulada (ACR) - neste ambiente encontram-se os consumidores cativos, no qual a contratação é formalizada por contratos celebrados entre os agentes vendedores (geradores, PIE, autoprodutores) e os compradores (exclusivamente distribuidores), que participam dos leilões promovidos pelo governo.
- Ambiente de Contratação Livre (ACL) - destinado ao atendimento dos consumidores livres, no qual a contratação é celebrada por meio de contratos bilaterais, negociados livremente entre os diversos tipos de agentes, geradores, autoprodutores, PIE, consumidores livres e comercializadores.

### 2.3.1 A matriz de energia elétrica do Brasil

O movimento governamental iniciado nos anos 90 partindo “do princípio de concorrência onde for possível e regulação onde for necessária”, segundo Montalvão e Silva (2014), garantiu que o país alcançasse, até o ano de 2014, 130 mil megawatts de potência instaladas para geração de energia elétrica, ligadas entre si pelas linhas de transmissão de grande e médio porte. De acordo com a ANEEL, no ano de 2017 o Brasil já totalizou 163 mil megawatts de potência instalada, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Capacidade de geração da matriz de energia elétrica brasileira em operação - novembro/2017

Tipo	Quantidade	Potência		%
		Outorgada (kW)	Fiscalizada (kW)	
Central Geradora Hidrelétrica (CGH)	623	570.007	572.463	0,37
Central Geradora Eólica (EOL)	483	11.909.439	11.855.743	7,61
Pequena Central Hidrelétrica (PCH)	430	4.969.491	4.960.209	3,18
Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV)	63	418.325	418.325	0,27
Usina Hidrelétrica (UHE)	219	101.188.678	94.488.995	60,67
Usina Termelétrica (UTE)	2.943	42.816.077	41.468.401	26,62
Usina Termonuclear (UTN)	2	1.990.000	1.990.000	1,28
<b>Total</b>	<b>4.763</b>	<b>163.862.017</b>	<b>155.754.136</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2017

É perceptível que a matriz de energia elétrica brasileira se encontra fortemente dependente da exploração dos potenciais hidrelétricos (CGH, PCH e UHE), responsáveis por 67% da capacidade de geração nacional. Essas usinas, desde que não tenham a característica de fio d'água, têm capacidade de armazenamento de água para geração futura, em caso de necessidade, trazendo maior segurança ao sistema nacional mesmo que dependente das ocorrências pluviométricas.

No caso brasileiro, nos períodos de seca, os ventos de maior intensidade e a colheita da cana de açúcar colocam as usinas eólicas e as termelétricas movidas a bagaço e palha de cana em posições de importância frente ao cenário energético, visto que essas passam a ser complementares ao regime de geração das hidráulicas, poupando o uso dos reservatórios e diminuindo a necessidade do acionamento das termelétricas movidas a combustíveis fósseis - as quais apresentam uma geração de maior custo.

### 2.3.2 Políticas e incentivos às fontes renováveis

A matriz energética mundial é alicerçada prevalentemente por fontes fósseis, as maiores produtoras de gases de efeito estufa (GEE), os quais têm sido classificados como uma ameaça ao equilíbrio ambiental do planeta, sendo causadores do aquecimento global.

As hidrelétricas - fonte renovável de geração de energia mais popular no planeta - não contribuem com a emissão de GEE, entretanto é questionada quanto aos impactos sociais e ambientais gerados em sua instalação. Desta forma, a busca por fontes alternativas, fontes renováveis de baixo impacto ambiental, é crescente e desde a década de 90 vem recebendo incentivos em diversos países.

O baixo impacto provocado ao meio ambiente pelas fontes alternativas - solar, eólica, biomassa, PCH e cogeração qualificada - sempre é a justificativa mais forte para que os programas de incentivo sejam criados pelos governos de todo o mundo. Os incentivos mostram-se necessários por 2 motivos, segundo Montalvão e Silva (2014), tornando necessário que o Estado intervenha para amenizar tais distorções:

- i. falha do mercado ao precificar corretamente o benefício socioambiental do uso dessas fontes;
- ii. possíveis dificuldades de introdução dessas fontes na matriz energética.

No Brasil, podem-se citar 3 medidas adotadas para incentivar a difusão das fontes alternativas:

- Desconto nas tarifas de uso do sistema de distribuição e transmissão de energia (TUSD /TUST)

A TUSD e a TUST são cobradas pela prestação de um serviço, ou seja, os consumidores do mercado livre e do mercado cativo (ACR) pagam para receber a energia adquirida; e os geradores pagam para enviar a energia produzida. As distribuidoras de energia recebem os valores de TUSD e TUST pagos pelos consumidores cativos, bem como a TUSD dos consumidores livres conectados em sua rede de distribuição. O Operador Nacional do Sistema (ONS) recebe a TUST dos consumidores do ACL conectados à rede básica (linhas de transmissão em tensões de 230 kV ou superior) e os valores pagos pelas distribuidoras.

Como um incentivo às fontes renováveis, o desconto na TUSD e TUST existe desde a década de 90, porém, assim como o mercado livre de energia, vem sendo constantemente alterado. Historicamente, a primeira oficialização aconteceu por meio da Lei 9.427 de 1996, a qual teve sua primeira modificação no ano de 1998, com a Lei 9.648, para que o desconto mínimo de 50% fosse estabelecido apenas para as PCH. Em 2002, a Lei 10.438 regulamentou o benefício também para fontes eólicas, biomassa e cogeração qualificada. A fonte solar e as CGH receberam o desconto apenas em 2003, por meio da Lei 10.762 que modificou o § 1º do art. 26 da Lei de 1996 e também estabeleceu o limite máximo de 30.000 kW de potência instalada como critério de beneficiária. Por último, em 2007, por meio da Lei 11.488, esse critério foi alterado para que fosse considerada a potência injetada na rede.

O subsídio, que não é exclusivo para geradores, também é concedido aos consumidores do mercado livre de energia que adquirem energia elétrica proveniente de fontes incentivadas.

Entretanto, os consumidores regulados ou cativos, atendidos pelo Ambiente de Contratação Regulada (ACR) não contam com esse benefício, uma vez que não tem a prerrogativa de escolher o fornecedor de energia elétrica, tendo seu consumo, inevitavelmente, atrelado à concessionária de distribuição.

O desconto na TUST e na TUSD concedido às fontes alternativas, na geração e no consumo, é, portanto, arcado pelas demais fontes de geração e pelos consumidores que não adquirem energia dessas fontes. Ou seja, trata-se de um subsídio cruzado e sem prazo de validade, uma vez que o desconto é permanente e a legislação não prevê prazo para sua extinção.

- Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA)

O PROINFA, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, foi criado com o intuito de incentivar as fontes eólicas, a biomassa e de PCH, objetivando um crescimento da participação dessas fontes na matriz energética nacional, aliando a valorização destes potenciais energéticos regionais e o interesse em aumentar a segurança do abastecimento de energia; e incentivando a indústria nacional, uma vez que uma das exigências do programa é a obrigatoriedade de um índice mínimo de nacionalização de 60% do custo total de construção dos projetos (COSTA; PRATES, 2005).

A entrada de novos empreendimentos no programa estava prevista para terminar no ano de 2008, ou quando atingissem 1.000 MW de potência instalada de cada uma das fontes incentivadas. Buscando aumentar ainda mais os incentivos às fontes, as entradas foram finalizadas apenas no ano de 2010 (GEHRING, 2014).

- Geração Distribuída (GD)

Segundo a ANEEL (2016), “a geração distribuída é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, normalmente, a partir de fontes renováveis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica”. Isso significa que 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.

A inovação da GD, que alia economia financeira, consciência socioambiental e auto sustentabilidade, foi citada pela primeira vez na Lei 10.848 de 2004, tendo suas condições gerais de acesso estabelecidas no ano de 2012, com a introdução da Resolução Normativa ANEEL nº 482, a qual também criou o sistema de compensação de energia elétrica

correspondente. Com o acompanhamento da sua implantação, foram identificados pontos regulatórios que necessitavam de aprimoramento, desta forma, objetivando reduzir custos e tempo para a conexão, compatibilização do Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento, aumentar o público alvo e melhorar as informações, foi publicada a Resolução Normativa (REN) nº 687/2015, que revisava a anterior.

Segundo a definição do Caderno Temático da ANEEL, a GD “é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, normalmente a partir de fontes renováveis ou mesmo utilizando combustíveis fósseis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica”, ou seja, consiste na produção de eletricidade a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes renováveis ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de unidades consumidoras. São diferenciadas em 2 tipos, de acordo com a potência instalada:

- microgeração: central geradora com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW);

- minigerção: central geradora com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW, exceto fontes hídricas, as quais são limitadas à uma potência instalada máxima de 3 MW.

### 2.3.3 Estudos de caso

Dentre as diversas possibilidades de aproveitamento energético do biogás, destacam-se duas: eletricidade e energia térmica, essa atualmente utilizada para secagem do lodo na própria ETE. No estudo de caso da ETE-UFES, Lima e Passami (2002), concluíram que era mais interessante economicamente, a geração de calor pela queima direta do biogás. Com produção diária de biogás de 5.486,40 litros - 85% de metano -, estimou-se a taxa de energia térmica de 78,83 kcal/hab.dia ao contrário de, apenas, 0,092 kcal/hab.dia ou 0,024 kWh/hab.dia de energia elétrica.

Lima (2005) realizou outro estudo comparativo entre usos da energia para diferentes ETEs existentes e em construção. Foram apresentadas análises econômicas e termodinâmicas de dois cenários de geração de energia a partir do biogás: combinação de turbina a gás e turbina a vapor e motor a gás - ciclo Otto - e turbina a vapor. Foi concluído, nesse trabalho, que as estações com sistemas UASB apresentam maior geração de biogás que processo de biodigestão do lodo e, conseqüentemente, maior geração de energia para suprir a demanda da

própria ETE. Também, foi apontado que o maior consumo de eletricidade da ETE é devido ao processo de aeração. Por exemplo, o biogás da ETE de Barueri, produzido da biodigestão anaeróbia do lodo aeróbio, tem 66% de metano, vazão de produção igual a 26.000 m<sup>3</sup>/dia, podendo gerar até 30,4% do seu próprio consumo de energia elétrica.

### 3 METODOLOGIA

Nessa seção são descritos os cálculos e as considerações necessários para determinar a geração de biogás em estações de tratamento e os custos analisados nos cenários criados a seguir para estudar a viabilidade do investimento nessa forma alternativa de geração de energia elétrica.

#### 3.1 Quantificação da vazão de afluente à ETE

Para o início dos cálculos, é preciso conhecer as características do esgoto sanitário afluente ao tratamento estudado. Desta forma, é necessário estimar a vazão e carga de entrada no sistema:

$$Q = \frac{Q_{hab} \times C_r \times Pop}{1000} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Sendo:

$Q$  = Vazão de esgoto afluente na ETE (m<sup>3</sup>/dia);

$Q_{hab}$  = Vazão de contribuição *per capita* (L/hab.dia);

$C_r$  = Coeficiente de retorno de esgoto/água *per capita*;

$Pop$  = População (hab).

Uma vez que 54% da população brasileira urbana vive em municípios com população superior a 100.000 habitantes, tomaremos como base de cálculo essa população para contribuição à ETE.

#### 3.2 Quantificação do volume de biogás produzido em reatores UASB

De acordo com as características físico-químicas dos esgotos sanitários definidas por Von Sperling (2005), serão adotadas as seguintes concentrações de DBO e DQO afluentes ao reator UASB, respectivamente: 300,0 mg/L e 600,0 mg/L.

A produção de biogás está relacionada à remoção total de carga orgânica no reator, desta forma é preciso ter conhecimento da DQO efluente ao tratamento, a qual depende da eficiência do reator, que será calculada utilizando a eficiência de remoção de DQO no reator UASB obtida pela Equação 3.2 (construída através de dados experimentais por Chernicharo *et al.* (1999)).

$$E_{DQO} = 1 - 0,68 \times TDH^{-0,35} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Sendo:

$E_{DQO}$  = Eficiência de remoção de DQO no reator UASB (%)

TDH = Tempo de detenção hidráulica (h)

Segundo a literatura, o TDH recomendado pelos autores varia entre 6 e 10 horas. Desta forma, será adotado 8 horas para os cálculos.

Para o cálculo da carga orgânica removida no reator é utilizada a Equação 3.3, buscando o comportamento da DQO. Como o Coeficiente de Produção de Sólidos Suspensos Totais ( $Y_{obs}$ ) no reator UASB pode variar entre 0,1 a 0,2  $kg_{DQO\text{lodo}}/kg_{DQO\text{aplicada}}$  (van Haandel e Lettinga, 1994), adotou-se o valor 0,2 uma vez que quanto mais elevada a produção de lodo, menor a produção de metano convertido da matéria orgânica. Assim, segundo a metodologia de Chernicharo *et al.*, as Equações 3.3, 3.4 e 3.5 permitem que a geração de metano seja estimada.

$$DQO_{util} = [Q \times (S_0 - S)] - (Y_{obs} \times S_0 \times Q) \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$K_{(T)} = \frac{P \times K}{R \times (273 + T)} \quad (\text{Equação 3.4})$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{ef}}{K_{(T)}} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Sendo:

$DQO_{util}$  = Carga orgânica convertida em metano ( $kg_{DQO}/dia$ );

Q = Vazão do efluente ( $m^3/dia$ );

$S_0$  = DQO afluente ao reator UASB ( $kg_{DQO}/dia$ );

S = DQO efluente ao reator UASB ( $kg_{DQO}/dia$ );

$Y_{obs}$  = Coeficiente de Produção de Sólidos Suspensos Totais ( $kg_{DQO\text{lodo}}/kg_{DQO\text{aplicada}}$ );

$K(T)$  = Fator de correção para a temperatura operacional do reator ( $g_{DQO_{CH_4}}/L$ );

P = Pressão atmosférica (atm);

K = DQO correspondente a 1 mol de  $CH_4$  ( $64g_{DQO}/mol$ );

R = Constante dos gases ( $0,08206 \text{ atm.L}/mol.K$ );

T = Temperatura operacional do reator ( $25^\circ C$ );

$Q_{CH_4}$  = Produção volumétrica de metano ( $m^3/dia$ )

Sendo uma mistura gasosa, foi considerado que o biogás gerado possui 60% de metano. Determinou-se o percentual de perdas de metano em relação à produção teórica em 40%, para que estejam incluídas condições desfavoráveis, tais como vazamentos ou gás muito diluído no

efluente. (PEROVANO, FORMIGONI, 2011). As eficiências de remoção de DBO para cada processo de tratamento foram 67% para reator UASB e 85% no sistema de lodos ativados, sendo 60% a do biodigestor, segundo conhecimento empírico de valores reais mais atingidos. Dessa forma é necessário que seja feito o ajuste dos volumes gerados, para obtenção da produção volumétrica de biogás ( $Q_{\text{biogás}}$ ) em ( $\text{m}^3/\text{dia}$ ) como exibido na Equação 3.6:

$$Q_{\text{biogás}} = \frac{Q_{\text{CH}_4} \times (1 - 0,4)}{0,6} \quad (\text{Equação 3.6})$$

### 3.3 Quantificação do volume de biogás gerado na digestão anaeróbia do lodo gerado no sistema de lodos ativados convencional (L.A.)

Em outro cenário, com o tratamento baseado em lodos ativados seguido de biodigestor, obteve-se o volume total de biogás a partir da razão entre sólidos suspensos voláteis e sólidos suspensos (SSV/SS) no lodo excedente produzido neste sistema. Adotou-se os valores típicos da literatura, como na Tabela 7:

Tabela 7 - Valores típicos para tratamentos aeróbio de lodos ativados convencional<sup>1</sup>.

<b>Coefficiente</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Faixa</b>	<b>Valor típico</b>
<b>Y</b>	Coefficiente de produção celular	gSSV/gDBO <sub>5</sub>	0,4-0,8	0,6
<b>Kd</b>	Coefficiente de respiração endógena	gSSV/gSSV.d	0,06-0,1	0,08-0,09
<b>θ</b>	Coefficiente de temperatura para Kd	-	1,05-1,09	1,07
<b>fb'</b>	Fração biodegr. ao gerar sólidos (SSb/SSV)	gSSb/gSSV	-	0,8
<b>SSV/SS</b>	SSV/SS no esgoto bruto	gSSV/gSS	0,7-0,85	0,8
<b>SSb/SSV</b>	SS biodegradável/SS no esgoto bruto	gSSb/SS	-	0,6
<b>SSV/SS</b>	SSV/SS ao gerar sólidos	gSSV/gSS	-	0,9
<b>O<sub>2</sub>/SSb</b>	Oxigênio por sól. biodreg. destruído	gDBO <sub>u</sub> /gSSb	-	1,42
<b>DBO<sub>u</sub>/DBO<sub>5</sub></b>	Relação DBO última/DBO <sub>5</sub>	gDBO <sub>u</sub> /gDBO <sub>5</sub>	1,2-1,5	1,46

<sup>1</sup> – Base DBO<sub>5</sub> e SSV, temperatura = 20°C

Fonte: Von Sperling (1997)

O rendimento global equivale à multiplicação das eficiências do tanque de aeração e do biodigestor que são, respectivamente 85% e 60%.

Outro valor considerado é a relação entre sólidos biodegradáveis sólidos suspensos ( $fb$ ) na matéria orgânica afluente porque a concentração mais relevante para produção de biogás é a que será degradada. Para tanto, também, é considerado a idade do lodo ( $\theta_c$ ) ou TDC igual a 8 dias.

$$f_b = \frac{f'_b}{1 + (1 - f'_b) \times K_d \times \theta_c} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Por meio da concentração de sólidos biodegradáveis no efluente resultante, foi calculada a DBO última suspensa ( $DBO_{5\text{ susp}}$ ) pela Equação 3.8. Em seguida, encontrou-se a carga de  $DBO_5$  removida na biodigestão pela diferença entre sólidos totais afluentes e  $DBO_5$  última suspensa.

$$DBO_{5\text{ susp}} = \frac{\frac{DBO_u}{Xb} \times Xb_{efl}}{\frac{DBO_u}{DBO_5}} \quad (\text{Equação 3.8})$$

Sendo:

$Xb$  = concentração de sólidos biodegradáveis;

$Xb_{efl}$  = concentração de sólidos biodegradáveis no efluente.

Assim, foi possível obter as parcelas de sólidos suspensos totais produzidos e de sólidos descartados por meio da relação SS/Sr. Então, foi determinada a proporção de sólidos totais removida, subtraindo os valores anteriores, para que seja estimado o volume de biogás gerado. A mesma taxa de perda na produção de metano para UASB, 40%, foi considerada.

O consumo de energia na aeração dos lodos ativados foi estimado conforme as demandas carbonácea e de nitrificação por oxigênio as quais definem a potência necessária dos aeradores. A primeira é referente ao oxigênio necessário para a oxidação da matéria orgânica e para respiração endógena da biomassa, representada pela Equação 3.9. Já a segunda demanda, representa a oxidação de amônia em nitrito e, após, nitrato. Os parâmetros  $a'$  e  $b'$  são, respectivamente, a fração da matéria removida qualificada para conversão em energia e a quantidade de oxigênio usado por dia no tanque de aeração para respiração endógena. Já  $V$  indica o volume do tanque calculado pela Equação 3.10.

A seguir, foi calculada a potência dos aeradores pela capacidade de oxigenação média adotada 2,1 kg  $O_2$ /kWh, recomendada para equipamentos de baixa rotação (JORDÃO, 2011). A potência equivale à razão entre a massa necessária de oxigênio e a capacidade de oxigenação. Em seguida, determinou-se o consumo de energia, considerando que os aeradores funcionem 24 horas por dia (t), segundo Equação 3.13.

$$MO_2 = a' \times (S_0 - S) \times Q + b' \times V \times X_v \quad (\text{Equação 3.9})$$

$$V = \frac{Y \times \theta \times Q \times (S_0 - S_{efl})}{X_{vaf} \times (1 + k_d \times \theta)} \quad (\text{Equação 3.10})$$

$$a' = \frac{DBOu}{DBO5} - \left( \frac{DBOu}{Xb} \right) \times Y \quad (\text{Equação 3.11})$$

$$b' = \left( \frac{DBOu}{Xb} \right) \times f_b \times K_d \quad (\text{Equação 3.12})$$

$$E = P \times t = \frac{M_{O_2}}{F_{O_2}} \times t \quad (\text{Equação 3.13})$$

Sendo:

$MO_2$  = consumo médio de oxigênio total;

$a'$  = consumo médio de oxigênio por demanda carbonácea;

$b'$  = consumo médio de oxigênio por demanda da nitrificação;

$V$  = volume do reator;

$X_v$  = concentração de SSV;

$X_{vaf}$  = concentração de SSV no afluente;

$E$  = energia consumida pelos aeradores.

### 3.4 Potencial energético do biogás gerado em Reator UASB e L.A.

A estimativa da energia elétrica produzida a partir do biogás pode ser feita através da estimativa da conversão de energia, trazida pela Equação 3.14.

$$P_{\text{geração EE}} = \frac{(Q_{\text{biogás}} \times 365)}{1000} \times \frac{PCI \times \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{gerador}} \times C_s}{C_{kw}} \quad (\text{Equação 3.14})$$

Sendo:

$P_{\text{geração EE}}$  = Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano)

$PCI$  = Poder calorífico inferior do biogás (kcal/m<sup>3</sup>);

$\eta_{\text{motor}}$  = Eficiência do motor (%);

$\eta_{\text{gerador}}$  = Eficiência do gerador (%);

$C_s$  = Coeficiente de segurança para correção de possíveis erros de cálculo – 94%;

$C_{kw}$  = Conversão de kcal para kWh (kcal/kWh) – 860,42.

Segundo Pecora (2006), como o rendimento dos motores de ciclo Otto varia entre 30 e 34%, será utilizado o menor rendimento, buscando manter um cenário conservador. Além disso, para o gerador foi considerado um rendimento de 90% para que eventuais perdas no sistema sejam contempladas pelos 10% retirados e seja mantido o cenário desejado. Sendo assim, teremos um conjunto moto-gerador com eficiência global de 27%.

Concluiu-se também que o valor de eficiência global adotado era válido, não apenas teoricamente, mas também no âmbito prático pois, através de contatos com a empresa Biogás Motores Estacionários – a fornecedora escolhida no presente projeto – obteve-se a informação de que nos projetos já em operação com seus equipamentos, a proporção de geração é de 1,65 kWh para cada m<sup>3</sup> de biogás de entrada.

### 3.5 Economia pela injeção da energia gerada na rede de distribuição

Através do mecanismo Sistema de Compensação, o consumidor pode injetar a energia gerada em sua unidade consumidora diretamente na rede de distribuição e ter o retorno em forma de créditos de energia, ou seja, ao fim do mês, a quantidade injetada na rede é descontada do montante consumido. Para calcular a receita gerada pela geração da energia elétrica será utilizada a tarifa de energia (TE) das distribuidoras, sendo ponderada o valor das tarifas do horário de ponta e horário de fora ponta.

$$T_{final} = \frac{[(TE_P + TUSD_P) \times H_P] + [(TE_{FP} + TUSD_{FP}) \times H_{FP}]}{24} \quad (\text{Equação 3.15})$$

$$Economia = P_{geração\ EE} \times T_{final} \quad (\text{Equação 3.16})$$

Sendo:

$T_{final}$  = Tarifa de Energia ponderada (R\$/MWh);

$TE_P$  = Tarifa de Energia do horário de ponta (R\$/MWh);

$TUSD_P$  = Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição – horário de ponta (R\$/MWh);

$H_P$  = Quantidade de horas do horário de ponta (horas);

$TE_{FP}$  = Tarifa de Energia do horário de fora ponta (R\$/MWh);

$TUSD_{FP}$  = Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição – horário de fora ponta (R\$/MWh);

$H_{FP}$  = Quantidade de horas do horário de fora ponta (horas);

Economia = Economia anual gerada pela injeção da energia gerada na rede de distribuição (R\$/ano);

$P_{geração\ EE}$  = Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano).

As tarifas de energia e uso do sistema de distribuição são diferentes entre as distribuidoras. Desta maneira, para o estudo teórico da análise de viabilidade econômica tomou-se como base as tarifas das 12 maiores distribuidoras do país, as quais são as líderes tanto no ranking de quantidade de consumidores atendidos, quanto em quantidade de energia distribuída, segundo a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE). Segundo a ANEEL, tais distribuidoras, juntas, possuem sob suas áreas de concessão 68% dos empreendimentos de geração distribuídas atualmente em funcionamento no Brasil.

Além da consideração dos valores de TUSD e TE dos horários de ponta e fora ponta, também é importante que seja considerado o ICMS, uma vez que, com a G.D. esse imposto também não é cobrado sobre a energia injetada e tão pouco sobre a energia “economizada” – os créditos disponibilizados. Visto que as taxas de ICMS também variam de acordo com o estado em que se encontram os empreendimentos, utilizou-se o respectivo índice vigente para cada distribuidora, com base em sua localidade.

Os Anexos II e III trazem a lista de distribuidoras consideradas, bem como os respectivos valores de tarifas e ICMS considerados, juntamente com a análise de ponderação das tarifas com e sem a tributação.

### 3.6 Análises de viabilidade econômica

O modelo de estudo da viabilidade econômica de projetos de uso do biogás para produção de energia elétrica foi composto por dados de mercado e parâmetros comparados com operações existentes de geração de energia elétrica. Dessa forma, buscou-se garantir alto grau de fidelidade à aplicação real. Apesar disso, é importante ressaltar a necessidade de generalização dos resultados apresentados.

Dentre as dificuldades para criar este modelo, destacam-se alguns valores de referência quanto ao uso do biogás como combustível. Embora tais valores tenham sido estudados e referenciados anteriormente por diversos autores, de forma conservadora, variações podem ocorrer, especialmente as dependentes do local de geração. Os principais exemplos são:

- Parcela de gás metano no biogás: quantidade é influenciada por muitos fatores, porém, ainda é possível adotar-se uma estimativa constante;
- Poder calorífico real do biogás: dependente de fatores ambientais como pressão atmosférica e temperatura ao ser queimado como combustível;

- Consumo específico de combustível em Kcal/KWh.

Para a análise econômica, foram utilizados os métodos do *payback* e do valor presente líquido (VPL) cuja aplicação é realizada dentro do período predefinido de projeto uma vez que o cálculo é feito para reduzir os valores de fluxo de caixa para valores atuais.

No modelo do VPL busca-se determinar o valor do investimento pelo fluxo de caixa descontado uma taxa que reflita o risco associado. O método possui princípios que devem ser avaliados criteriosamente para que seja feita uma ótima decisão. Tais princípios são: os cálculos são com base nos fluxos de caixa de natureza operacional e a taxa de desconto deve ser apropriada com o mercado, porém também deve buscar remunerar os proprietários de capital.

Especificamente, determina-se a Taxa Interna de Retorno (TIR) para verificar a rentabilidade do investimento. Tal taxa indica igualdade entre os fluxos de entrada e de saída de caixa, ou seja, quando o VPL é nulo. Ao ser comparada a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), essa taxa deve ser maior para que o investimento seja interessante e considerado. A TMA indica o valor mínimo de rentabilidade de um projeto para que seja viável pela perspectiva do empreendedor.

A taxa de juros a ser descontada foi determinada conforme a diferença entre a taxa Selic e IGP-M. A taxa de desconto ou taxa de juros é utilizada na análise para determinar o valor presente dos fluxos de caixa futuros. Tal taxa representa tanto o valor do tempo do dinheiro quanto o risco ou a incerteza dos fluxos de caixa futuros; quanto maior a incerteza dos fluxos de caixa futuros, maior a taxa de desconto.

Trabalhou-se com a taxa de juros real, definida como a taxa de juros menos a inflação, com o intuito de prevenir a estimativa da flutuação de inflação. Neste caso, para o mês de setembro de 2017, com a Selic em 8,25% – segundo o Banco Central - e IGP-M em 0,47 – segundo análises da FGV, determinou-se a taxa referenciada nos resultados em 7,8%. Segundo Wottrich (2010), é possível fazer esse cálculo simplificado porque não há uma empresa específica em questão com custo de capital definido e nem, imposto sobre o débito adquirido. Tais valores dependem da estrutura de capital da empresa que pode incluir ações em bolsas de valores, fundos e outros débitos de forma a tornar o cálculo mais complexo.

A sigla Selic refere-se à Sistema Especial de Liquidação e Custódia, tratando de um sistema destinado a regular a movimentação de títulos públicos federais. Pode ser considerada

como a taxa de juros da economia brasileira. Já o Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M) é o indicador de flutuação dos preços, publicado mensalmente. Trata-se, hoje, do fator de referência utilizado para o reajuste dos aumentos da energia elétrica e dos contratos de aluguéis. (ADVFN, 2017)

Segundo Biezma e San Cristobal (2006), o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e a análise de *payback* são os critérios mais utilizados para investimentos em Eficiência Energética. Desta forma, serão utilizadas duas destas três técnicas para analisar a viabilidade econômica do investimento de geração de energia elétrica em ETEs.

### 3.6.1 Análise dos custos de adesão do sistema de geração de energia

As variáveis de custo da presente pesquisa foram consideradas a partir da instalação do processo de geração de energia, ou seja, considerou-se que a instalação prévia de tratamento da ETE já estava prevista na avaliação inicial de projeto. Os custos das licenças ambientais e permissões legais para instalação da usina e, principalmente, da linha de transmissão não foram contemplados devido à grande variabilidade de valores conforme localização e outras particularidades. A distinção de investimentos atrativos ou não para geração de energia elétrica a partir do biogás de ETEs não deve ser, estritamente, baseada na análise financeira, de maneira que possa incluir dados das externalidades positivas que seriam geradas pelas melhorias no tratamento e pelas emissões evitadas de gases de efeito estufa. Tais valores não foram quantificados neste trabalho devido à metodologia de medição das emissões e conversão em carbono equivalente ser mais complexa e dependente das concentrações no efluente, de maneira que poderia tornar o resultado muito variável.

- Purificador

Sendo necessária a extração da parcela de sulfeto presente no biogás gerado, para evitar o comprometimento do sistema de aproveitamento energético, foi considerado o uso de um purificador que opera num sistema de filtros.

- Gasômetro

Mesmo sendo considerada a operação constante (24 horas por dia) tanto da ETE quanto da geração de energia, é necessário que haja um gasômetro para regularizar eventuais intermitências na vazão de entrada nos equipamentos. O gasômetro foi dimensionado para armazenamento de 2 horas de produção de biogás.

- Grupo Gerador

O dimensionamento do grupo motor-gerador foi baseado nos equipamentos e seus respectivos custos da marca Biogás Motores Estacionários, a partir da potência do motor e da vazão de entrada de cada modelo;

- Painel de Comando

Segundo recomendações da empresa fornecedora dos motores, para a geração distribuída é necessária a utilização do painel de comando e proteção da G.G. Sendo assim, seguiu-se o valor informado de R\$ 30.000,00, de acordo com os valores de referência de setembro de 2017 da Biogás Motores Estacionários;

- Operação e manutenção

De acordo com SOUZA *et. al.* (2004), os gastos com operação e manutenção representam, anualmente, aproximadamente 4% do investimento total. Sendo assim, contabilizou-se esse fator nos custos, tendo como referência o investimento no grupo gerador, purificador, gasômetro e painel de controle; calculado pela Equação 3.17:

$$C_{o\&m} = (C_p + C_{gas} + C_{gg} + C_{pc}) \times 0,04 \quad (\text{Equação 3.17})$$

Sendo:

$C_{o\&m}$  = Custo de operação e manutenção (R\$);

$C_p$  = Custo do investimento no equipamento de purificação (R\$);

$C_{gas}$  = Custo do investimento no gasômetro (R\$);

$C_{gg}$  = Custo do investimento no grupo gerador (R\$);

$C_{pc}$  = Custo do investimento no painel de comando (R\$).

- Custo dos operadores

Representa os gastos com os profissionais que operam o sistema de geração de energia. Visto que a ETE e o gerador trabalham continuamente, 24 horas por dia, e os turnos de operadores são de até 8 horas por dia, foi estimado a necessidade de 4 funcionários. Tal número foi determinado considerando que todos trabalhem 8 horas durante 5 dias e 6 horas durante 2 dias, resultando no total de 42 horas por semana. O custo considerado equivale a um salário mínimo de 2017, R\$ 937,00, incrementado com 20% referente a impostos.

Para o cálculo do custo do operador utilizou a Equação 3.18:

$$C_{op} = \frac{\text{horas de operação} \times \text{dias de operação} \times S}{\text{horas trabalhadas por mês}} \quad (\text{Equação 3.18})$$

Sendo:

$C_{op}$  = Custo dos operadores (R\$/mês);

S = Salário do profissional autônomo considerando 20% de encargos (R\$).

- Depreciação dos equipamentos:

Calculada adotando a vida útil de 20 anos, conforme estimativa para projetos de ETE, através da Equação 3.19:

$$D = \frac{100\% \times C}{V_u} \quad (\text{Equação 3.19})$$

Sendo:

D = Depreciação dos equipamentos (R\$)

C = Custo total dos equipamentos (R\$);

$V_u$  = Vida útil (anos)

A base de todas as técnicas de análise de investimentos é o fluxo de caixa, cuja representação tende a facilitar a definição de entradas e saídas de recursos monetários num certo período, ou seja, uma demonstração visual de receitas e despesas distribuídas pela linha de tempo posterior.

Por fim, os resultados do investimento foram avaliados para a reutilização da energia na própria ETE, isto é, a geração de crédito com a distribuidora para que haja economia na conta de energia. Neste caso, a concessionária de energia elétrica deverá autorizar a instalação de equipamentos de proteção e sincronismo entre a rede elétrica e a fonte geradora, de forma a aumentar o custo da planta deste projeto. Este estudo não abrange a resistência do mercado à aceitação da técnica, nem outras estratégias para superá-la, além da avaliação econômica e viabilidade técnica. Recomenda-se, portanto, uma análise futura que considere todos os aspectos incluídos na concepção do projeto, como necessidade de operação especializada, autorizações de obra e licenciamento ambiental, entre outros.

### 3.6.2 Análise de *payback*

Também conhecido como método do tempo de recuperação do investimento, o *payback* é o método mais simples de analisar um investimento. Consistindo em quantificar, por meio de fluxo de caixa, o período necessário para recuperar o investimento inicialmente feito, esse método analisa o momento em que o lucro líquido acumulado ao longo do tempo se torna igual ao investimento inicial (PAMPLONA, 2006)

Algumas vantagens são a simplicidade e a possibilidade avaliação de risco do investimento, pois quanto menor o período de *payback*, mais líquido é o investimento e, portanto, menos arriscado. Por outro lado, algumas desvantagens são não considerar o valor do dinheiro no tempo, o custo de capital da empresa e nem os fluxos de caixa após o período de *payback*.

O período pode ser encontrado tanto pela análise de fluxo de caixa, quanto pela razão entre custo do investimento e lucro esperado, equivalente à Equação 3.20.

$$TRI = \frac{C_0}{R} \quad (\text{Equação 3.20})$$

Sendo:

TRI = Tempo de Recuperação do Investimento dos equipamentos (anos)

$C_0$  = Custo inicial do investimento (R\$);

R = Receita anual (R\$/ano)

### 3.6.3 Análise de Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido está entre os métodos mais comuns de análise de investimentos, sendo o somatório do valor presente das entradas e das saídas de caixa. O cálculo, basicamente, é feito para descontar os fluxos de caixa do projeto que está sendo avaliado a uma determinada taxa de interesse da empresa investidora. Essa taxa, usualmente chamada de taxa de desconto, é o retorno mínimo que deve ser esperado para que o projeto seja aceito, ou a TMA.

Se o fluxo de caixa do projeto, computada a taxa de desconto, for maior ou igual a zero significa que executar o projeto é viável, pois este remunera o capital investido a uma taxa igual ou maior que a taxa mínima de retorno. Algumas vantagens desse método mais exato são inclusão do valor do dinheiro no tempo e do custo de capital da empresa; possibilidade de ser aplicado a qualquer fluxo de caixa. Ademais, sob o ponto de vista econômico, é

considerado o método mais correto. Todavia, as desvantagens destacadas são complexidade, necessidade de vários parâmetros, definição em termos absolutos ao invés de relativos e, portanto, não engloba o tamanho do investimento.

O equacionamento deste método é simplificado pela Equação 3.21:

$$VPL = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (\text{Equação 3.21})$$

Sendo:

$C_0$  = custo inicial;

$C_i$  = fluxo de caixa ano a ano;

$i$  = período em anos;

$n$  = tempo total do projeto;

$r$  = taxa de risco a ser descontada.

O valor final do VPL deve ser positivo para que o investidor tenha lucro superior aos juros do risco considerado. No caso de o resultado final ser zero, não haveria lucro nem despesas, ou seja, a taxa de juros seria a taxa mínima de atratividade de maneira que o investidor não tenha muitas garantias com tal investimento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados teóricos de volume de biogás gerado, de energia elétrica convertida e dos possíveis retornos econômicos. Os resultados são discutidos e comparados com observações de outros autores e valores de estações reais em funcionamento, assim como outras opções para o estudo econômico são mencionadas para futuros estudos.

### 4.1 Quantificação da vazão de afluente à ETE

A vazão afluente à ETE foi calculada a partir da Equação 3.1:

$$Q = \frac{Q_{hab} \times C_r \times Pop}{1000} = \frac{200 \times 0,8 \times 100.000}{1000} = 16.000 \text{ m}^3/\text{dia}$$

### 4.2 Sistema de tratamento anaeróbio – Reator UASB

#### 4.2.1 Quantificação do volume de biogás produzido em reator UASB

Com base nos dados de concentração de DBO e DQO afluentes típicos conhecidos através do Von Sperling (2005) e seguindo a metodologia de Chernicharo *et al.* (1999), foi calculada a eficiência de remoção de DQO no reator UASB e a DQO efluente (S) através da Equação 3.2:

$$E_{DQO} = 1 - 0,68 \times TDH^{-0,35} = 1 - 0,68 \times 8^{-0,35} = 67\%$$

$$S = S_0 \times (1 - E_{DQO}) = 0,600 \times (1 - 0,67) = 0,197 \text{ kgDQO/m}^3$$

A partir das Equações 3.3, 3.4 e 3.5, obteve-se a produção volumétrica de metano:

$$DQO_{ef} = [Q \times (S_0 - S)] - (Y_{obs} \times S_0 \times Q)$$

$$DQO_{util} = [16.000 \times (0,600 - 0,197)] - (0,2 \times 0,600 \times 16.000) = 4.527 \text{ kg/dia}$$

$$K_{(T)} = \frac{P \times K}{R \times (273 + T)} = \frac{1 \times 64}{0,08206 \times (273 + 25)} = 2,617 \text{ kgDQO/m}^3$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{ef}}{K_{(T)}} = \frac{4.527}{2,617} = \frac{1729,80 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

Com os ajustes de volume, ou seja, considerando que o biogás produzido é composto por 60% de metano e que no processo há 40% de perdas, através da Equação 3.6 obteve-se uma produção volumétrica de biogás no tratamento UASB de 1729,8 m<sup>3</sup>/dia.

#### 4.2.2 Potencial energético do biogás gerado no reator UASB

A capacidade de geração de energia elétrica foi estimada através da Equação 3.14, da seguinte forma:

$$P_{\text{geração EE}} = \frac{(Q_{\text{biogás}} \times 365)}{1000} \times \frac{PCI \times \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{gerador}} \times C_s}{C_{kw}}$$

$$P_{\text{geração EE}} = \frac{(1730 \times 365)}{1000} \times \frac{5136,46 \times 0,3 \times 0,9 \times 0,94}{860,42} = 956,6 \text{ MWh/ano}$$

#### 4.2.3 Economia pela injeção da energia gerada no reator UASB na rede de distribuição

A tarifa de energia ponderada e a economia gerada pela injeção da energia gerada na rede de distribuição foram calculadas pelas Equações 3.15 e 3.16, respectivamente. Para as tarifas de energia e uso do sistema de distribuição foram utilizadas as tarifas vigentes nas 12 maiores distribuidoras do país, sem e com ICMS, conforme Anexos II e III, respectivamente. É visível a importância da contabilização desse importo e, portanto, temos que a Tarifa Final de economia considerando o ICMS é de R\$ 612,60. Desta forma, temos:

$$T_{\text{final}} = R\$612,60/\text{MWh}$$

$$\text{Economia} = P_{\text{geração EE}} \times T_{\text{final}} = 956,6 \times 612,60 = R\$586.013,16/\text{ano}$$

### 4.3 Sistema de tratamento aeróbio – Lodos ativados convencional com biodigestor

#### 4.3.1 Quantificação do volume de biogás produzido no sistema de L.A.

Em primeiro lugar, determinou-se a DBO solúvel do efluente final a partir da concentração de sólidos suspensos (SS) no efluente de 18,0 mg/L, valor determinado pelas eficiências do sistema. A razão entre sólidos voláteis e suspensos (SSV/SS) para os cálculos de produção de lodo foi de 0,9; valor ideal indicado por Von Sperling (2007), após um tempo igual à idade de lodo. Logo, a concentração de sólidos suspensos voláteis no efluente é 16,2 mg/L.

$$f_b = \frac{0,8}{1 + (1 - 0,8) \times 0,08 \times 8} = 0,71 \text{ mgSS}_b/\text{SSV}$$

Por meio desse fator  $fb$ , definiu-se a concentração de sólidos biodegradáveis no efluente igual a 11,5 mg/L. A seguir, foi calculada a DBO última suspensa pela Equação 3.8.

$$DBO_{u\ susp} = \frac{1,42 \times 11,5}{1,46} = 11,5 \text{ mg/L}$$

Assim, calculou-se a DBO<sub>5</sub> solúvel máxima de ser obtida por meio da DBO<sub>5</sub> remanescente após os processos no tanque e biodigestor, sendo equivalente a efluente total menos a suspensa, ou seja, 6,8 mg/L. A carga de DBO<sub>5</sub> removida na biodigestão foi encontrada:

$$DBO_{5\ re} = Q \times (DBO_{af} - DBO_{5\ sol}) = 16000 \times (312,5 - 8,8) = 4690,7 \text{ kg/dia}$$

Segundo Von Sperling (2007), a razão entre sólidos suspensos e removidos (SS/Sr) típica é 0,84 para TDH de 8 dias e Y de 0,6. Logo, os sólidos suspensos totais produzidos resultaram em 3940,3 kg/dia. Por sua vez, os sólidos descartados no efluente final representam 288,0 kg/dia, determinados a partir da vazão e da concentração de SS no efluente. Por fim, o valor de SS total removido, adicionando o gerado no processo, é resultado da subtração entre estes valores, sendo igual a 3652,3 kgSS/dia ou 2812,2 kgSSV/dia.

O volume de biogás gerado, teoricamente, a partir da faixa 0,8 a 1,1 m<sup>3</sup> biogás/ kg SSV destruído. Utilizando o menor valor para não superestimar a produção de gás, obteve-se 2249,8 m<sup>3</sup> biogás/dia ou 1349,88 m<sup>3</sup> metano/dia (60%). Adicionando o valor de perda prática de 40% na geração de metano, conclui-se que o volume gerado de biogás é 1349,88 m<sup>3</sup>/dia.

#### 4.3.2 Potencial energético do biogás gerado no sistema de L.A.

A capacidade de geração de energia elétrica foi estimada por meio da Equação 3.14, da seguinte forma:

$$P_{\text{geração EE}} = \frac{(1349,88 \times 365)}{1000} \times \frac{5136,46 \times 0,3 \times 0,9 \times 0,94}{860,42} = 746,5 \text{ MWh/ano}$$

No balanço energético do tratamento de lodos ativados estimou-se que o consumo de oxigênio foi de 4325,8 kgO<sub>2</sub>/dia. A partir disso, o resultado de potência necessária foi calculado em 85,83 kW/dia ou 2059,91 kWh/dia o qual equivale a 61,8 MWh/mês.

$$MO_2 = a' \times (S_0 - S) \times Q + b' \times V \times X_v = 4325,83 \text{ kgO}_2/\text{dia}$$

$$V = \frac{Y \times \theta \times Q \times (S_0 - S_{efl})}{SSV_{af} \times (1 + k_d \times \theta)} = 5,9 \text{ m}^3$$

$$a' = \frac{DBOu}{DBO_5} - \left( \frac{DBOu}{Xb} \right) \times Y = 0,61 \text{ kg } O_2/\text{kg } DBO_5$$

$$b' = \left( \frac{DBOu}{Xb} \right) \times f_b \times K_d = 0,08 \text{ kg } O_2$$

$$E = P \times t = \frac{M_{O_2}}{F_{O_2}} \times t = 85,83 \times 24 \times 30 = 61,8 \text{ MWh/mês}$$

Dessa forma, têm-se o balanço energético teórico líquido do sistema de lodos ativados, a partir da equação da geração de 62,2 MWh/mês subtraído o consumo de 61,8 MWh/mês, resultando em 408 kWh/mês.

#### 4.3.3 Economia pela injeção da energia gerada no sistema de L.A. na rede de distribuição

Analogamente, considerando-se a mesma tarifa de energia aplicada para o cenário com UASB, foi calculada a Tarifa Final de economia considerando o ICMS, para a geração líquida de energia, ou seja, deduzindo o valor de consumo de energia previsto pelos aeradores.

$$Economia = P_{geração EE} \times TE_{final} = 746,60 \times 612,60 = R\$457.282,10/ano$$

#### 4.4 Análise de custos de implantação do sistema

Visto o volume de biogás diário gerado e, conseqüentemente, a vazão por hora de entrada nos equipamentos, de acordo com o Anexo I, o equipamento de geração considerado no presente estudo foi o mesmo para os dois casos teóricos. Desta maneira, a análise dos custos de implantação do sistema foi equivalente para ambos tipos de tratamento.

- Purificador - valor comercial adotado foi R\$ 2.000,00. Esse custo aproximado de R\$ 0,048/m<sup>3</sup> biogás foi baseado no custo do componente listado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2006) reajustado e calculado por SANTOS; BARROS; FILHO (2015).
- Gasômetro – o custo aproximado foi estimado a partir do valor de R\$ 173,00/m<sup>3</sup> (CETESB, 2006) de biogás que foi corrigido para R\$ 90,00/m<sup>3</sup> no ano de 2017 por meio da calculadora do cidadão do Banco Central, aplicando-se a taxa de IGP-M.
- Grupo Gerador – visto a vazão de biogás produzida de, no máximo, 70 m<sup>3</sup>/hora, é necessário a utilização de um motor do modelo Scania DC-12, de 200 kVA de potência e valor de R\$ 190.000,00.

- Painel de Comando – conforme adotado, custo de R\$30.000,00
- Operação e manutenção – considerando um valor de 4% do investimento inicial por ano, pela Equação 3.17, temos:

$$C_{o\&m} = (C_p + C_{gas} + C_{gg} + C_{pc}) \times 0,04$$

$$C_{o\&m} = (2000 + 24.937,95 + 190.000,00 + 30.000,00) \times 0,04 = R\$9.877,52/ano$$

- Custo dos operadores – de acordo com a Equação 3.18:

$$C_{op} = R\$57.826,29/ano$$

- Depreciação dos equipamentos: seguindo a Equação 3.19, tem-se:

$$D = \frac{100\% \times C}{V_u} = \frac{100\% \times (C_p + C_{gas} + C_{gg} + C_{pc})}{20}$$

$$D = \frac{100\% \times (R\$246.937,95)}{20} = R\$12.346,90/ano$$

O custo de investimento inicial no primeiro ano é de R\$ 243.255,38, somando o custo anualizado de operação e manutenção, ou seja, os últimos dois itens da tabela foram estimados para os 20 anos de projeto e divididos ano a ano, conforme a Tabela 8. Tais custos na vida útil do projeto seriam R\$ 9.797,52 de operação e manutenção e R\$ 57.826,29 de operadores. O cálculo da depreciação já foi feito na base anual. Para definir o fluxo de caixa inicial do *payback* foi considerada a soma do purificador, conjunto gerador, painel de comando e gasômetro, totalizando R\$ 228.486,75.

Tabela 8 - Custo de investimento inicial – primeiro ano de operação

<b>Equipamento/Operação</b>	<b>Custo no primeiro ano</b>
Purificador	R\$ 2.000,00
Conjunto gerador	R\$ 190.000,00
Painel de comando	R\$ 30.000,00
Gasômetro	R\$ 6.486,75
Depreciação equipamentos	R\$ 11.424,34
Operação e manutenção	R\$ 489,88
Custo operadores	R\$ 2.891,31
<b>SOMA</b>	<b>R\$ 243.255,38</b>

A Tabela 9 traz o comparativo dos dados e resultados obtidos nos cálculos nas seções prévias.

Tabela 9 - Comparativo dos sistemas de tratamento e a economia gerada em cada um deles pela geração de energia

	UASB	Lodos ativados com biodigestor
<b>Eficiência (%)</b>	70	85
<b>DBO (g/hab.dia)</b>	48	48
<b>DQO (g/hab.dia)</b>	96	96
<b>Volume biogás (m<sup>3</sup>/dia)</b>	1729,80	1349,88
<b>Produção energia (MWh/mês)</b>	79,7	62,2
<b>Economia (R\$/ano)</b>	323.347,12	194.616,06 <sup>[1]</sup>

*Notas:*

<sup>[1]</sup>: Não foi considerado o consumo de energia do processo de lodos ativados.

A princípio, mesmo sem considerar o consumo da aeração, nota-se melhor oportunidade do investimento para o tratamento com reatores UASB. A relação entre o custo total – R\$ 523.859,26 – e a energia produzida, durante a vida útil de 20 anos do projeto, para reator UASB e lodos ativados são, respectivamente, R\$ 0,33/kWh e R\$ 0,42/kWh. Com essa base de custo unitária, compreende-se que o custo foi distribuído ao longo de todo período de operação e torna-se mais simples comparar ambas as tecnologias. Dessa forma, o retorno de investimento da geração de energia a partir do biogás de tratamento anaeróbico com reator UASB é maior do que o de tratamento aeróbico visto que tem menor custo por unidade de venda.

Já a relação do custo total anualizado e vazão afluyente à estação de tratamento – em ambos os tipos de sistemas – foi de R\$ 0,042/m<sup>3</sup> de esgoto, valor que refletiria pouco na conta individual da população. Além disso, na conversão média do dólar de 3,10; esse custo seria US\$ 0,014/m<sup>3</sup>, um pouco superior ao apresentado por França Junior (2008) para uma planta de médio porte, visto que este estudo levou em conta todos os gastos de equipamentos e operação do sistema de geração de energia elétrica e, não apenas os operacionais.

Numa segunda análise, considerando o balanço energético da aeração, haveria uma economia de R\$ 2.977,94 no ano – valor bem abaixo do custo estimado. Em função disso, o tempo de retorno de investimento extrapolou para 83 anos, indicando a inviabilidade do investimento no caso da aeração ser um fator da avaliação econômica. Como o sistema de

lodos ativados apresenta maior consumo de energia elétrica, a redução do consumo é pouco significativa.

É importante ressaltar que os valores previstos de volume de biogás, 17,3 L/hab.dia para UASB e 12,23 L/hab.dia para lodos ativados, estão dentro de faixas teóricas apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo dos valores de vazão de metano e biogás obtidos a partir de diferentes metodologias

<b>Metodologia</b>	<b>Vazão de metano (L<sub>CH4</sub>/hab.dia)</b>	<b>Vazão de biogás (L<sub>biogás</sub>/hab.dia)</b>
<b>Chernicharo <i>et al.</i> (1999)<sup>[1]</sup></b>	19,2/11,5 <sup>[2]</sup>	27/4/16,4 <sup>[2]</sup>
<b>Metcalf &amp; Eddy (2003)</b>	12,5 <sup>[3]</sup>	17,9
<b>Mello (2007)</b>	19,0 <sup>[3]</sup>	27,2
<b>Veronez e Gonçalves (2002)<sup>[4]</sup></b>	25,2 <sup>[3]</sup>	35,9

*Notas:*

<sup>[1]</sup>: Metodologia utilizada no presente trabalho. A vazão de biogás é estimada a partir da consideração de 70% de metano em sua composição

<sup>[2]</sup>: O valor é obtido quando consideradas perdas de 40% de metano.

<sup>[3]</sup>: Vazão de metano estimado a partir da consideração de biogás com 70% de metano em sua composição.

<sup>[4]</sup>: No estudo há produção adicional de biogás devido à digestão de lodo aeróbio no reator.

Fonte: PEROVANO e FORMIGONI (2011)

## 4.5 Análise de viabilidade econômica

### 4.5.1 Payback

De acordo com a Equação 3.21 foram calculados os *paybacks* dos investimentos em cada tipo de estação de tratamento:

$$TRI_{UASB} = \frac{R\$ 228.486,75}{R\$ 586.017,67/ano} = 0,4 \text{ ano} = 4,7 \text{ meses}$$

$$TRI_{lodos \text{ ativados}} = \frac{R\$ 228.486,75}{R\$ R\$ 457.282,10 /ano} = 0,5 \text{ ano} = 6,0 \text{ meses}$$

Desta forma, percebe-se que o retorno do investimento estimado é menor para o sistema de tratamento por Reator UASB devido ao maior saldo de energia a ser adquirido como crédito monetário. O consumo de energia pela aeração dos lodos ativados torna o investimento menos atrativo comparando ambos, porém ainda é viável. Realizando a análise

pelo fluxo de caixa, obtêm-se mesmo período de retorno de investimento esperado com os respectivos valores; conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Análise de fluxo de caixa ano a ano - *payback*

Ano	UASB		Lodos ativados com biodigestor	
	Fluxo de caixa	Valor presente acumulado	Fluxo de caixa	Valor presente acumulado
<b>0</b>	-R\$228.486,75	-R\$228.486,75	-R\$228.486,75	-R\$228.486,75
<b>1</b>	R\$571.249,05	R\$342.762,30	R\$442.513,48	R\$214.026,73
<b>2</b>	R\$571.249,05	R\$914.011,35	R\$445.690,55	R\$659.717,28
<b>3</b>	R\$571.249,05		R\$445.690,55	

Com a discriminação do fluxo de caixa, nota-se que os valores acumulados de capital tornam-se positivos com menos de 1 anos, assim como indicado pelo TRI de ambos os tratamentos de esgoto. Tal resultado é justificado pela maior precisão da análise por meio do fluxo de caixa do investimento anual e não o valor do capital momentâneo no início de investimento.

#### 4.5.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Faz-se necessário adotar um horizonte de projeto para o cálculo do VPL, visto que o método de avaliação depende da previsão atual de valores futuros. Adotou-se 20 anos devido à durabilidade do conjunto gerador. Os valores presentes que podem ser esperados ao longo dos anos de investimento são exibidos na Tabela 12, pela coluna de juros, e permitem calcular o VPL no fim. Cada linha nessa tabela representa o valor do fluxo de caixa e o valor da razão de cada ano a ser somada para o cálculo do VPL, como indicado na Equação 3.21. O fluxo de caixa nesses cenários foi calculado pela entrada – economia líquida devido ao volume de biogás gerado – subtraída as saídas – custos variáveis de operação, manutenção e depreciação ano a ano; os quais são iguais. Essa soma do custo de saídas inclui o custo anual com manutenção dos equipamentos (R\$ 489,88), o custo da depreciação anual (R\$ 12.346,90) e o custo anual dos operadores (R\$ 2.891,31), totalizando R\$ 15.728,09.

Tabela 12 - Análise de fluxo de caixa ano a ano - VPL

Ano	UASB		Lodos ativados	
	Fluxo de Caixa	Juros 7,8%	Fluxo de Caixa	Juros 7,8%
<b>0</b>	-R\$ 228.486,75		-R\$ 228.486,75	
<b>1</b>	R\$ 571.249,05	R\$530.013,96	R\$ 442.513,48	R\$410.571,05
<b>2</b>	R\$ 571.249,05	R\$491.755,39	R\$ 442.513,48	R\$380.934,36
<b>3</b>	R\$ 571.249,05	R\$456.258,48	R\$ 442.513,48	R\$353.436,96
<b>4</b>	R\$ 571.249,05	R\$423.323,88	R\$ 442.513,48	R\$327.924,44
<b>5</b>	R\$ 571.249,05	R\$392.766,64	R\$ 442.513,48	R\$304.253,52
<b>6</b>	R\$ 571.249,05	R\$364.415,14	R\$ 442.513,48	R\$282.291,26
<b>7</b>	R\$ 571.249,05	R\$338.110,17	R\$ 442.513,48	R\$261.914,32
<b>8</b>	R\$ 571.249,05	R\$313.704,00	R\$ 442.513,48	R\$243.008,28
<b>9</b>	R\$ 571.249,05	R\$291.059,57	R\$ 442.513,48	R\$225.466,95
<b>10</b>	R\$ 571.249,05	R\$270.049,70	R\$ 442.513,48	R\$209.191,83
<b>11</b>	R\$ 571.249,05	R\$250.556,41	R\$ 442.513,48	R\$194.091,51
<b>12</b>	R\$ 571.249,05	R\$232.470,23	R\$ 442.513,48	R\$180.081,19
<b>13</b>	R\$ 571.249,05	R\$215.689,58	R\$ 442.513,48	R\$167.082,20
<b>14</b>	R\$ 571.249,05	R\$200.120,22	R\$ 442.513,48	R\$155.021,52
<b>15</b>	R\$ 571.249,05	R\$185.674,73	R\$ 442.513,48	R\$143.831,44
<b>16</b>	R\$ 571.249,05	R\$172.271,97	R\$ 442.513,48	R\$133.449,10
<b>17</b>	R\$ 571.249,05	R\$159.836,68	R\$ 442.513,48	R\$123.816,20
<b>18</b>	R\$ 571.249,05	R\$148.299,01	R\$ 442.513,48	R\$114.878,64
<b>19</b>	R\$ 571.249,05	R\$137.594,19	R\$ 442.513,48	R\$106.586,23
<b>20</b>	R\$ 571.249,05	R\$127.662,08	R\$ 442.513,48	R\$98.892,40
<b>Soma</b>		R\$5.701.632,03		R\$4.416.723,38
<b>VPL</b>		R\$5.473.145,28		R\$4.188.236,63

Com ambos os sistemas de tratamento, o valor está acima de zero com a taxa mínima de desconto, indicando também que o investimento é viável e que há atratividade, apesar de algumas configurações aplicadas não permitem um dado mais acurado. Mais especificamente, é possível acompanhar o comportamento do investimento ao longo do tempo. Esta avaliação do equilíbrio econômico resume o lucro do investimento pelas diferenças de fluxo descontadas ao longo da vida útil do projeto. Dessa forma, o lucro – similar ao valor de VPL - do investimento com o UASB é mais interessante por ser maior que o valor para lodos ativados.

A proximidade das estações de tratamento aos centros de consumidores favorece a geração distribuída, reduzindo custos de infraestrutura de transmissão de energia elétrica, apesar de ser necessário um preparo por parte das distribuidoras para suportar as cargas de entrada em períodos distribuídos ao longo do dia. Outros benefícios à sociedade brasileira são o incentivo à ampliação do saneamento básico devido à viabilidade econômica apresentada para estação que atendem 100 mil habitantes, proporção da maioria das cidades do país.

Outro aspecto que favorece os resultados de viabilidade do projeto foi o método de conversão por motor de ciclo-Otto o qual diversos estudos indicam ser mais econômico que a microturbina. Segundo Costa (2006), o custo de implantação de geração por motor e gerador é menor comparado com o custo de microturbina. Todavia, ambas as tecnologias de geração em pequena escala de potência representarão um preço mais elevado devido à menor geração de energia. De tal forma, são necessários maiores incentivos para o desenvolvimento de mecanismo de desenvolvimento limpo no Brasil, a partir da fonte estudada.

Ademais, as tecnologias disponíveis de recuperação energética do biogás no país ainda apresentam custos elevados, uma vez que a maioria dos equipamentos são importados. Isso ocorre devido à demanda desse tipo de tecnologia ser baixa e parte de um mercado em crescimento no Brasil. Recentemente, os fabricantes nacionais começaram a participar do mercado, principalmente, com sistemas de pequenas escalas destinados à zona rural. Ainda assim, este estudo demonstra como é atrativo este mercado para aproveitamento energético a partir do tratamento do esgoto, apesar de nem todos os custos de um projeto real terem sido considerados, como tubulações, construção, dentre outros. Destaca-se que o presente estudo teve como objetivo justificar, de forma simples e abrangente, a adoção de tecnologia para reaproveitamento de biogás em ETEs.

Sob a perspectiva do meio ambiente, esse investimento auxiliaria na redução de emissões metano e outros gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera e no odor ao redor de estações, causado em grande parte pelo gás sulfídrico ( $H_2S$ ).

## 5 ESTUDOS DE CASO

Buscando aproximar o presente estudo da realidade, desenvolveu-se um estudo de caso para cada tipo de sistema de tratamento de esgoto analisado, anaeróbio com reator UASB e aeróbio com o sistema de lodos ativados convencional. Os dados de entrada (DBO, DQO e eficiência na remoção de carga) foram coletados de duas Estações de Tratamento de Esgoto, localizadas no estado de São Paulo, em área sob concessão da distribuidora CPFL Paulista, a qual apresentou a menor tarifa final dentre as maiores distribuidoras do país, ou seja, apresenta o cenário menos favorável dentre as premissas adotadas no cenário teórico.

Para que sejam mantidas as proposições do presente trabalho, permitindo também a confrontação com os resultados teóricos, seguiu-se com a população considerada de 100.000 habitantes e operação de 24 horas por dia.

### 5.1 ETE Monjolinho – São Carlos/SP

Segundo o Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos (SAAE), o esgoto do município possui uma concentração de DBO de 167 mg/L e 536 mg/L de DQO. De acordo com os dados, após o reator UASB as concentrações caem para 43 mg/L e 279 mg/L, respectivamente (SAAE, 2017). Neste estudo de caso, observou-se que as características de concentração de matéria orgânica no esgoto são consideravelmente menores que os valores adotados no estudo teórico apresentado no desenvolvimento do estudo, gerando um volume de biogás e energia menor e, conseqüentemente, aumentando o *payback* e VPL. Isso acontece devido à ETE se encontrar em uma região com elevada disponibilidade hídrica, ou seja, os moradores locais não sofrem com o racionamento no fornecimento de água, e clima ameno, a temperatura ambiente não influencia para que haja perda da parcela de água do esgoto através da evaporação. Sendo assim, o esgoto da cidade de São Carlos apresenta características de um esgoto diluído, diminuindo a eficiência do sistema UASB.

Sendo assim, o sistema apresenta 47,95% de eficiência na remoção de DQO, ou seja, 2397kg da carga de entrada é convertida em metano.

A partir da carga convertida, obteve-se a produção volumétrica diária de 915,80m<sup>3</sup> de metano. Seguindo as mesmas considerações de composição química do biogás e índice de perdas do gás, a produção volumétrica diária de biogás é de 915,80m<sup>3</sup>/dia.

Para o aproveitamento energético na ETE Monjolinho seria necessário um motor que comportasse a vazão de entrada de 38,16 m<sup>3</sup> de biogás por hora. Desta forma, foi considerada nos cálculos a utilização de um equipamento da marca MWM, modelo 6.12, de potência de 120 kVA e vazão de entrada de 40 m<sup>3</sup>/hora, o qual apresenta um custo de R\$ 140.000,00, de acordo com as informações da Biogás Motores Estacionários (Anexo I). Seguindo os parâmetros de rendimento adotados para o motor e gerador, o potencial energético de geração equivale a 506,50 MWh por ano, ou seja, 42,20 MWh mensalmente.

De acordo com o Anexo III, a média ponderada das tarifas de uso do sistema de distribuição e energia tributadas para a CPFL Paulista considerada foi de R\$ 492,44/MWh. Desta forma, a economia gerada pela instalação do sistema foi estimada em R\$ 20.780,96 por mês.

Analisando a viabilidade econômica, observou-se que por meio do método do *payback*, o investimento seria pago em 8,6 meses, ou seja, no 9º mês a ETE Monjolinho já passaria a ter uma economia acumulada positiva em relação ao cenário sem o aproveitamento energético, calculado de forma similar a Tabela 11.

## 5.2 Estação de Tratamento de Esgoto de Franca – Franca/SP

Ocupando uma área de 200.000 m<sup>2</sup>, a Estação de Tratamento de Esgoto de Franca é uma referência no país no sistema de lodos ativados convencional. De acordo com os dados da Biblioteca Didática de Tecnologias Ambientais da UNICAMP, a estação recebe um esgoto bruto com 751 mg/L de DQO, 366 mg/L de DBO e 294 ml/L SST. Após o tratamento, o efluente final apresenta os respectivos parâmetros reduzidos a 63,17 mg/L, 12,50mg/L e 19,83 ml/L.

Utilizando como base de entrada de cálculos esses dados para as mesmas considerações teóricas, obtém-se produção de biogás de 1663,5 m<sup>3</sup>/dia, indicando necessidade do mesmo motor Scania do modelo teórico sem afetar os custos. O potencial de geração de energia resultante foi de 76,7 MWh/mês, desconsiderando-se consumo de energia pela aeração. Já com este consumo, o potencial foi reduzido para 14,9 MWh/mês.

No primeiro caso, a economia devido a esse menor consumo de energia foi estimada em R\$ 37.770,15/mês e o *payback* de 4,7 meses. Por sua vez, o impacto do consumo da aeração reduz a economia para R\$ 7.337,36/mês e o *payback* aumenta para 24 meses.

Para a ETE de Franca, o volume de biogás foi próximo, porém maior do que o modelo teórico, indicando tanto a veracidade do modelo adotado quanto oportunidades reais melhores de viabilidade econômica. Essa diferença ocorreu por conta da maior carga de matéria orgânica afluyente e maior eficiência do processo, permitindo maior concentração para produção o biogás.

Tabela 13 - Análise de fluxo de caixa ano a ano para as estações de estudo de caso - VPL

Ano	ETE São Carlos		ETE Franca	
	Fluxo de Caixa	Juros 7,8%	Fluxo de Caixa	Juros 7,8%
0	-R\$ 228.486,75		-R\$ 228.486,75	
1	R\$ 234.628,08	R\$217.691,67	R\$ 438.473,15	R\$406.822,37
2	R\$ 234.628,08	R\$201.977,80	R\$ 438.473,15	R\$377.456,27
3	R\$ 234.628,08	R\$187.398,21	R\$ 438.473,15	R\$350.209,94
4	R\$ 234.628,08	R\$173.871,05	R\$ 438.473,15	R\$324.930,36
5	R\$ 234.628,08	R\$161.320,33	R\$ 438.473,15	R\$301.475,56
6	R\$ 234.628,08	R\$149.675,57	R\$ 438.473,15	R\$279.713,82
7	R\$ 234.628,08	R\$138.871,37	R\$ 438.473,15	R\$259.522,94
8	R\$ 234.628,08	R\$128.847,07	R\$ 438.473,15	R\$240.789,51
9	R\$ 234.628,08	R\$119.546,36	R\$ 438.473,15	R\$223.408,35
10	R\$ 234.628,08	R\$110.917,02	R\$ 438.473,15	R\$207.281,82
11	R\$ 234.628,08	R\$102.910,58	R\$ 438.473,15	R\$192.319,37
12	R\$ 234.628,08	R\$95.482,07	R\$ 438.473,15	R\$178.436,98
13	R\$ 234.628,08	R\$88.589,79	R\$ 438.473,15	R\$165.556,67
14	R\$ 234.628,08	R\$82.195,01	R\$ 438.473,15	R\$153.606,11
15	R\$ 234.628,08	R\$76.261,84	R\$ 438.473,15	R\$142.518,20
16	R\$ 234.628,08	R\$70.756,95	R\$ 438.473,15	R\$132.230,65
17	R\$ 234.628,08	R\$65.649,43	R\$ 438.473,15	R\$122.685,70
18	R\$ 234.628,08	R\$60.910,58	R\$ 438.473,15	R\$113.829,75
19	R\$ 234.628,08	R\$56.513,81	R\$ 438.473,15	R\$105.613,05
20	R\$ 234.628,08	R\$52.434,41	R\$ 438.473,15	R\$97.989,47
<b>Soma</b>		R\$2.341.820,92		R\$4.376.396,89
<b>VPL</b>		R\$2.113.334,17		R\$4.147.910,14

Observa-se na Tabela 13, o VPL positivo indicando a viabilidade do projeto, porém em valor menor do que o teórico para ambos os tratamentos. Como esperado, esse lucro estimado acompanha os resultados de geração de volume de biogás. Mais importante ainda, garante-se

a atratividade do investimento para diferentes capacidades e afluentes das estações, assim como objetivo proposto, até aquela com menor carga de DBO igual a 167 mg/L.

Ambos os casos de estudo são de estações de tratamento da faixa de 100.00 mil a 200.00 mil habitantes, sugerindo que a viabilidade econômica pode ocorrer não só exclusivamente em projetos de grande escala. Em 2016, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) iniciou o projeto de geração renovável na ETE de Barueri cuja projeção de capacidade é 20 bilhões de litros de esgoto, referentes a 4,4 milhões habitantes da região.

Segundo Zanette (2009), as maiores estações de tratamento da região Sudeste apresentam potencial de produção de metano e geração de eletricidade na faixa 10 vezes superior aos valores calculados neste estudo, assegurando a viabilidade econômica da geração de energia para estas ETEs também. Dentre estas, estão as estações de Suzano (SP), Alegria (RJ) e Belo Horizonte (MG) cujas capacidades são bem distintas. Apenas a ETE Barueri possui um projeto de aproveitamento do biogás para a geração de eletricidade que, em sua etapa inicial, deve resultar na instalação de 2,6 MW de capacidade (SABESP, 2008, apud ZANETTE, 2009).

As estações de porte mais próxima do modelo teórico estudado por Zanette (2009) são as de Belo Horizonte (MG) com população atendida de 1 milhão de habitantes e geração de 6,0 MW<sub>med</sub>, a partir do tratamento por reator UASB e, a de Suzano (RJ) com 720 mil habitantes e 2,2 MW<sub>med</sub> após tratamento com biodigestor. Ressalta-se que o cálculo simplificado de viabilidade econômica deve apresentar resultados semelhantes, uma vez que os custos de estações maiores seriam mais elevados, porém podem ser considerados outros rendimentos para o equilíbrio financeiro.

Apesar da comparação com estações reais, o estudo permitiu observar que não existem muitos exemplos desse aproveitamento do biogás pelo esgoto no Brasil, ao contrário de outros países. Acredita-se que tal fato deve-se ao pequeno mercado brasileiro de aproveitamento do biogás, incluindo mão de obra e tecnologia, o qual pode começar a crescer pela análise financeira positiva destes projetos.

A partir do exposto, certas análises futuras são recomendadas para que os resultados de viabilidade econômica sejam mais detalhados e abrangentes de outras realidades. Algumas sugestões que auxiliariam no aumento da atratividade destes projetos - inclusive para lodos ativados com balanço energético - são a avaliação do benefício da cogeração do biogás para

que o calor seja reutilizado no processo também, reduzindo mais o uso de eletricidade comprada.

Além disso, outro fator que aumentaria o interesse no investimento e, por isso, torna-se motivador do crescimento do mercado é a venda de créditos de carbono a partir de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) previsto no Protocolo de Quioto. Tal abordagem é facilitada visto que os projetos de geração de energia contemplam toda a estrutura necessária para a obtenção de créditos de carbono e, principalmente, a receita de comercialização é extremamente significativa, como observado em outros trabalhos.

Para exemplificar a importância de outros fatores no estudo de viabilidade econômica e, até mesmo, no próprio processo de geração de energia pelo biogás, utilizou-se o caso da Califórnia, na qual as 268 ETEs com capacidade de mais de 4546,09 m<sup>3</sup> por dia, apenas 117 possuem digestores. A capacidade de geração dessas plantas varia de 30 kW a 3 MW. A partir de 2005, apenas 23 ETEs produziam energia usando cogeração. Atualmente, a capacidade total de geração de eletricidade baseada em biogás dessas plantas é de aproximadamente 35 MW (KULKARNI, 2010).

A matriz de energia elétrica brasileira é majoritariamente composta por hidrelétricas que, na maior parte dos casos, estão a distâncias consideráveis dos grandes centros consumidores. Por isso, a energia elétrica gerada é transmitida via extensas redes de transmissão que geram inevitáveis perdas de potência. A geração de energia elétrica por meio do biogás, por outro lado, está geralmente próxima aos grandes centros urbanos, evitando-se parcialmente os investimentos em transmissão e perdas em transmissão.

Apesar de geração de energia elétrica por meio do biogás não alcançar volume suficiente para substituir outras fontes de energia elétrica como a hídrica nem abastecer a estação por completo, sua exploração é uma medida paliativa fundamental a ser aplicada no curto e médio prazo. Os ganhos obtidos pela ETE com a implantação da planta de reaproveitamento de biogás são a diminuição do uso de eletricidade comprada, redução de poluentes na atmosfera e a possibilidade de receitas pela comercialização de créditos de carbono, possibilitando uma maior atratividade de investimento.

## 6 CONCLUSÃO

Na análise financeira, com as taxas de referência do ano de 2017, os custos e os benefícios foram alocados no modelo para que haja alguma correspondência no tempo e com a realidade. A correspondência das receitas com as despesas, demonstrada pelo fluxo de caixa, é importante porque torna o resultado melhor estimado, permitindo a variabilidade de taxas e ativos. Em nenhum dos cenários estudados houve resultado de prejuízo, porém o Valor Presente Líquido de tratamento com reator UASB torna o retorno monetário maior, sendo a escolha mais atrativa e de menor risco no modelo teórico. Já os resultados dos estudos de caso indicaram melhor lucro a partir do tratamento com biodigestor em lodos ativados, caso da ETE de Franca. Essa oposição com o resultado do modelo teórico representa a influência da composição e qualidade do esgoto na quantidade de biogás gerada. O potencial energético da ETE de Franca mostrou-se quase o dobro do potencial da ETE de São Carlos, devido à alta carga orgânica, visto que o esgoto são carlense possivelmente é muito diluído.

É importante ressaltar que a análise financeira é mais fiel ao ser realizada por diversos métodos e, principalmente, alguns mais exatos como o VPL que considera a taxa de desconto e variação ao longo dos anos. Os resultados do *payback* simples devem ser tratados apenas como o ponto inicial para se pensar em realizar um investimento visto que não representam uma análise mais profunda.

Os resultados da estimativa de produção energética obtidos no presente estudo indicam que há viabilidade econômica para geração de energia elétrica em estações de tratamento cuja vazão correspondente é de 100.000 habitantes. Tanto o tratamento anaeróbio quanto o aeróbio, apresentaram lucratividade dentro da durabilidade do projeto, exceto o cenário que abrangeu o balanço energético da aeração do sistema de lodos ativados, o que reduziu o lucro e elevou o tempo de retorno do investimento visto que a economia anual era muito baixa em relação aos gastos anualizados do projeto.

Em comparação do modelo teórico com estudos de caso, é possível afirmar que a análise financeira depende de muitos fatores tanto de parâmetros da ETE quanto do fluxo de caixa de maneira que cada projeto, com suas proporções, deva ser avaliado cuidadosamente para se compreender a atratividade do investimento.

A conscientização sobre a importância ambiental e econômica do reaproveitamento de subprodutos é essencial para que o mercado de serviços e equipamentos dessa conversão

continue crescente no Brasil, seja com incentivos públicos ou não. Ademais, concluiu-se que o valor resultante das análises financeiras varia muito conforme as considerações de consumo, geração, preços, juros, e outros para calcular o VPL e *payback*. Portanto, faz-se necessário diversos tipos de estudo financeiro do investimento com o maior conjunto de dados possíveis para que a projeção seja a mais verídica possível.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9648: Estudos de concepção de sistemas de esgoto sanitário – Procedimento. Rio de Janeiro. 1986.
- ADVFN – IGPM – *O índice IGPM*. 2017. Disponível em <https://br.advfn.com/indicadores/igpm>. Acesso em 12 de out. de 2017.
- Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis ANP N° 104, de 08 de Julho de 2002. Diário Oficial da União de 9.7.2002. Brasília, 2002.
- ALVES, J.W.S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos, 2000
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2 ed – Brasília : ANEEL, 2016.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração. 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> Acesso em 25 de nov. de 2017.
- Atlas de energia elétrica do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília: ANEEL, 2008
- AVELLAR, L. H. N. A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental. Guaratinguetá. Tese (Doutorado). FEG/UNESP. 2001.
- BALESTIERI, J.A.P. Cogeração: Geração combinada de eletricidade e calor. Florianópolis: UFSC, 2002. 279p.
- BENETTI, A.; BIDONE, F. O meio ambiente e os recursos hídricos. IN: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. Da Universidade/UFRGS/ABRH, 669p. 1995.
- BIEZMA, M.V.; SAN CRISTOBAL, J. R. Investment criteria for the selection of cogeneration plants-a state of the art review. Applied Thermal Engineering, v. 26 p. 583-588, 2006
- BOHN, C. Viabilidade Econômica da Implantação de uma Etapa de Purificação de Biogás no Processo de Geração de energia Elétrica em um Abatedouro de Aves. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, Paraná. 2013.
- 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, 212p. 2016.
- CAMPOS, J. R, et al. Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo. Rede Cooperativa de Pesquisas (RECOPE) - Programa de Pesquisas em

Saneamento Básico (PROSAB). PUC-PR, UFMG, UFPb, UFRGS, UFRN, UNICAMP, USP, Rio de Janeiro, 1999

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Aterro: Geração de Biogás e uso energético, versão 1.0 / CETESB, Departamento ambiental, Ministério brasileiro de ciência e tecnologia. São Paulo, 2006: SMA: CETESB: MCT. CD-ROM. Manual do usuário v. 1-2.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN HAANDEL, A.; AISSE, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. Capítulo 7: Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo. In: CAMPOS, J. R. (coordenador). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. 1. ed. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 1999. p. 155-198.

CHERNICHARO, C. A. L. Biological Wastewater Treatment Series - Volume 4: Anaerobic Reactors. Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Minas Gerais, Brazil. IWA Publishing, 2007, chapters 1,2,3,4.

CITY OF PORTLAND. Beneficial Reuse of Biogas. Environmental Services. Disponível em <https://www.portlandoregon.gov/bes/article/344953>. Acesso em 12 de out. de 2017.

COELHO, S. T., et al. (2006). Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás proveniente do Tratamento de Esgoto utilizando um Grupo gerador de 18 kW. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 02 de jun. de 2006; site do CENBIO – Centro Nacional de referência em Biomassa.

COLDEBELLA, A. Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais. 2006. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006

CONAMA, Resolução. 20, de 18 de junho de 1986. Estabelecimento de classificação de águas doces, salobras e salinas do território nacional. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1986.

COSTA, D. F. Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás de Tratamento de Esgoto. Dissertação de Mestrado em Energia – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. 2005.

DENG, S.; XU, L. Mean-risk efficient portfolio analysis of demand response and supply resources. Energy, vol. 34, 2009.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2017. Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf). Acesso em: 25 de nov de 2017.

FERNANDEZ, M.R. Contratação ótima para comercialização de energia elétrica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, p. 107, 2010.

FORESTI, E.; ZAIAT, M.; VALLERO, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. In: Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2006, 5:3-p.19.

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

FRARE, L. M. estudos para a implementação de uma planta para remoção de ácido sulfídrico de processos de produção de biogás. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, p. 182, 2006

GEHRING, C. G. Análise da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na fermentação anaeróbica de vinhaça. Monografia (Graduação em engenharia elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

GODOY JÚNIOR, E.; SILVEIRA, J.L.; GIACAGLIA, G.E.O. Miniestação de tratamento de esgoto e reuso de águas associada à sistema de cogeração energética no aproveitamento do biogás produzido. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2004.

GRYSCHKEK, J.M.; BELO, F.R. Produção e uso do gás metano na agricultura e agroindústria. Piracicaba, ESALQ. 15p. 1983

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores sociais municipais. Uma análise dos resultados do universo do censo demográfico de 2010. - Rio de Janeiro, 2011.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, Efluentes Urbanos. Secretariado para América Latina e Caribe, São Paulo, 77p. 2009

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos, 6ª Edição. Sermograf Artes Gráficas e Editora Ltda, Rio de Janeiro, 2011.

KULKARNI, P. Biogas from sewage plants helping to meet California's environmental mandates. Decentralized Energy. 2010. Disponível em: <http://www.decentralized-energy.com/articles/print/volume-11/issue-4/features/biogas-from-sewage.html>. Acesso em 12 de out. de 2017.

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

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. Vitória, 2012.

MAO, C.; FENK, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on Research Achievements of Biogas From Anaerobic Digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, 2015, p. 541

MASSOTTI, Z. Viabilidade técnica e econômica do biogás a nível de propriedade. Epagri. Concórdia-SC. 2009

MAYO, R. Mercado de eletricidade. Rio de Janeiro: Synergia, 2012. 207 p.

METCALF & EDDY. INC., 2003. *Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse*. 4.ed. New York, McGraw - Hill Book, 1815p

MONTALVÃO, E; SILVA, R. M. Descontos na TUST e na TUSD para Fontes Incentivadas: uma avaliação. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/ CONLEG/Senado, Fevereiro/2015 (Texto para Discussão nº 165). Disponível em: [www.senado.leg.br/estudos](http://www.senado.leg.br/estudos). Acesso em 27 de setembro de 2017.

NOGUEIRA L.A.H. Biodigestão, A Alternativa Energética. Editora Nobel, São Paulo. 1986

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Concórdia: Embrapa suínos e aves, 42p., 2006.

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. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PAMPLONA, E. O. Engenharia Econômica I. Universidade Federal de Itajubá. 2006. Disponível em: <http://www.iepg.unifei.edu.br/edson/download/Apostee1.PDF>. Acesso em 09 de out. de 2017.

PECORA, V. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP–Estudo de Caso. São Paulo, 2006.

PEROVANO, T. G.; FORMIGONI, L. P. A. Geração de energia a partir de subprodutos do tratamento de esgotos sanitários. Vitória, 2011

PRATI, L. Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010. P. 24.

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto. Qualidade do esgoto tratado. São Carlos. 2017. Disponível em: <http://www.saaesaocarlos.com.br/joomla4/index.php/estogomenutop/qualidadeesgototratadomenu>. Acesso em 09 de out. de 2017.

SANTOS, I. F.; Barros, R. M.; FILHO, G. L. T. Uma avaliação energética, econômica e ambiental das opções de aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no

Brasil. *REGET/UFSM – Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*. Santa Maria, V. 19, n.21, p. 1344-1356, mai-ago. 2015

SCHUHMANN, E.; RAABE, T. Catálogo de tecnologias e empresas de biogás. Projeto Brasil - Alemanha de fomento ao aproveitamento energético do biogás no Brasil, 2014.

SOARES, S. R. A.; BERNARDES, R. S.; NETTO, O. M. C. Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. *Cad. Saúde Pública*, v. 18, n. 6, p. 1713-1724, 2002.

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custa da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. Maringá, 2004.

TEIXEIRA, E. N. Adaptação de estruturas existentes (esterqueiras) e biodigestores. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Campinas, SP. 285f. 1985.

VAN HAANDEL, A. C.& LETTINGA, G. “Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente”, Epgraf, Campina Grande, 240p. 1994.

VON SPERLING, M. Princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1996. v.2. 1996. 211p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

VON SPERLING, M. Biological Wastewater Treatment Series - Volume 5: Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors. Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Minas Gerais, Brazil. IWA Publishing, 2007, chapters 1,2.

WOTTRICH, B. Modelo para a Análise Econômica e Financeira em Projetos de Geração Distribuída de Energia com Fontes Alternativas. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2010.

ZACHOW, C. R. Biogás. DeTec – Departamento de Tecnologia, UNIJUI – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 12p. 2000.

ZANETTE, A. L. Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 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. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2012

## ANEXO I

Informações técnicas e valores de referência de 09/2017 dos equipamentos da Biogás Motores Estacionários Ltda.



## Tabela de modelos dos grupos geradores a Biogás

Potência 40 kVA - Motor MWM – D-229/4	R\$ 70.000,00
• 30 kVA contínuo	(consumo de 15m <sup>3</sup> )
Potência 60 kVA – Motor MWM – D-229/6	R\$ 80.000,00
• 50 kVA contínuo	(consumo de 20m <sup>3</sup> )
Potência 120 kVA – Motor MWM – 6.12	R\$ 140.000,00
• 112 kVA contínuo	(consumo de 40m <sup>3</sup> )
Potencia 150 kVA – Motor Cummins Série C	R\$ 160.000,00
• 120 kVA contínuo	(consumo de 50m <sup>3</sup> )
Potência 200 kVA – Motor Scania – DC 12	R\$ 190.000,00
• 180 kVA contínuo	(consumo estimado de 80m <sup>3</sup> )

## Todos os grupos utilizam gerador WEG

Valores para operação singela. Para geração distribuída deve-se acrescentar em torno de R\$ 30.000,00 para o painel de comando e proteção do GG. É de responsabilidade do cliente a regularização do projeto com a concessionária de energia elétrica, bem como das adaptações e preparações necessária ao GG.



## ANEXO II

Análise das tarifas médias de energia elétrica e uso do sistema de distribuição das 12 maiores distribuidoras brasileiras, de acordo com dados de quantidade de consumidores atendidos e quantidade de energia elétrica distribuída, desconsiderando a cobrança de ICMS

Distribuidora	Estado	Posição no Ranking <sup>1</sup>		Tarifas Horário Ponta <sup>2</sup>		Tarifas Horário Fora Ponta <sup>2</sup>		Média ponderada		TARIFA FINAL
		Quantidade de consumidores <sup>3</sup>	Energia distribuída <sup>4</sup>	TUSD	T.E.	TUSD	T.E.	TUSD	TE	
<b>AES Eletropaulo</b>	SP	2	1	R\$462,00	R\$348,99	R\$134,64	R\$228,85	R\$175,56	R\$243,87	R\$419,43
<b>Ampla ENEL RJ</b>	RJ	11	12	R\$707,18	R\$356,51	R\$209,45	R\$234,18	R\$271,67	R\$249,47	R\$521,14
<b>CELESC</b>	SC	10	7	R\$477,38	R\$409,81	R\$145,83	R\$264,68	R\$187,27	R\$282,82	R\$470,10
<b>CELG</b>	GO	9	8	R\$501,07	R\$312,70	R\$157,78	R\$205,14	R\$200,69	R\$218,59	R\$419,28
<b>CELPE</b>	PE	7	10	R\$625,14	R\$345,23	R\$175,88	R\$222,44	R\$232,04	R\$237,79	R\$469,83
<b>CEMIG</b>	MG	1	2	R\$638,29	R\$361,72	R\$169,69	R\$235,87	R\$228,27	R\$251,60	R\$479,87
<b>COELBA</b>	BA	3	6	R\$609,95	R\$320,90	R\$158,10	R\$205,56	R\$214,58	R\$219,98	R\$434,56
<b>COELCE</b>	CE	8	11	R\$596,69	R\$371,92	R\$134,81	R\$237,44	R\$192,55	R\$254,25	R\$446,80
<b>COPEL</b>	PR	4	3	R\$492,97	R\$364,91	R\$141,86	R\$238,81	R\$185,75	R\$254,57	R\$440,32
<b>CPFL Paulista</b>	SP	6	4	R\$371,80	R\$368,14	R\$113,80	R\$241,98	R\$146,05	R\$257,75	R\$403,80
<b>ELEKTRO</b>	SP	12	9	R\$587,20	R\$396,52	R\$154,45	R\$261,37	R\$208,54	R\$278,26	R\$486,81
<b>Light</b>	RJ	5	5	R\$595,34	R\$388,74	R\$205,98	R\$254,76	R\$254,65	R\$271,51	R\$526,16
<b>Média</b>				R\$462,00	R\$348,99	R\$134,64	R\$228,85	R\$175,56	R\$243,87	<b>R\$419,43</b>

<sup>1</sup> - ABRADEE, 2016; <sup>2</sup> - ANEEL, 2017 – Resoluções Homologatórias; <sup>3</sup> - Posição de acordo com a quantidade de consumidores residentes na área de concessão da distribuidora. <sup>4</sup> – Posição de acordo com o volume de energia distribuído, ou seja, consumido pelos consumidores sob a área de concessão.



## ANEXO III

Análise das tarifas médias de energia elétrica e uso do sistema de distribuição das 12 maiores distribuidoras brasileiras, de acordo com dados de quantidade de consumidores atendidos e quantidade de energia elétrica distribuída, considerando a cobrança de ICMS.

Distribuidora	Estado	Quantidade de consumidores	Energia distribuída	ICMS	TUSD	T.E.	TUSD	T.E.	TUSD	TE	TARIFA FINAL
<b>AES Eletropaulo</b>	SP	2	1	18%	R\$563,41	R\$425,60	R\$164,20	R\$279,09	R\$214,10	R\$297,40	R\$511,50
<b>Ampla ENEL RJ</b>	RJ	11	12	29%	R\$996,03	R\$502,13	R\$295,00	R\$329,83	R\$382,63	R\$351,37	R\$734,00
<b>CELESC</b>	SC	10	7	25%	R\$636,51	R\$546,41	R\$194,44	R\$352,91	R\$249,70	R\$377,10	R\$626,79
<b>CELG</b>	GO	9	8	27%	R\$686,40	R\$428,36	R\$216,14	R\$281,01	R\$274,92	R\$299,43	R\$574,35
<b>CELPE</b>	PE	7	10	25%	R\$833,52	R\$460,31	R\$234,51	R\$296,59	R\$309,38	R\$317,05	R\$626,44
<b>CEMIG</b>	MG	1	2	25%	R\$851,05	R\$482,29	R\$226,25	R\$314,49	R\$304,35	R\$335,47	R\$639,82
<b>COELBA</b>	BA	3	6	27%	R\$835,55	R\$439,59	R\$216,58	R\$281,59	R\$293,95	R\$301,34	R\$595,29
<b>COELCE</b>	CE	8	11	25%	R\$795,59	R\$495,89	R\$179,75	R\$316,59	R\$256,73	R\$339,00	R\$595,73
<b>COPEL</b>	PR	4	3	29%	R\$694,32	R\$513,96	R\$199,80	R\$336,35	R\$261,62	R\$358,55	R\$620,17
<b>CPFL Paulista</b>	SP	6	4	18%	R\$453,41	R\$448,95	R\$138,78	R\$295,10	R\$178,11	R\$314,33	R\$492,44
<b>ELEKTRO</b>	SP	12	9	18%	R\$716,10	R\$483,56	R\$188,35	R\$318,74	R\$254,32	R\$339,35	R\$593,67
<b>Light</b>	RJ	5	5	29%	R\$838,51	R\$547,52	R\$290,11	R\$358,82	R\$358,66	R\$382,40	R\$741,07
<b>Média</b>					<b>R\$741,70</b>	<b>R\$481,21</b>	<b>R\$211,99</b>	<b>R\$313,43</b>	<b>R\$278,21</b>	<b>R\$334,40</b>	<b>R\$612,60</b>

<sup>1</sup> - ABRADDEE, 2016; <sup>2</sup> - ANEEL, 2017 – Resoluções Homologatórias; <sup>3</sup> - Posição de acordo com a quantidade de consumidores residentes na área de concessão da distribuidora. <sup>4</sup> – Posição de acordo com o volume de energia distribuído, ou seja, consumido pelos consumidores sob a área de concessão.