

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO
BIOGÁS PROVENIENTE DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
DESPEJOS INDUSTRIAIS DE UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

Rafaela Passucci Flores

Prof.Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro (SP)
2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

RAFAELA PASSUCCI FLORES

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO
BIOGÁS PROVENIENTE DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE DESPEJOS
INDUSTRIAIS DE UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheira
Ambiental.

Rio Claro – SP
2020

RAFAELA PASSUCCI FLORES

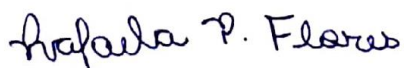
ESTUDO DA VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE DESPEJOS INDUSTRIAIS DE UMA
INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheira
Ambiental.

Comissão Examinadora:
Marcelo Loureira Garcia
Pedro Augusto Brava da Silva
Felipe Machado Rodrigues de Oliveira

Rio Claro, 15 de dezembro de 2020.

Assinatura da aluna



Assinatura do orientador



RESUMO

O Brasil é um dos maiores consumidores de cervejas do mundo. O elevado consumo de bebidas representa uma produção de águas residuárias. Para o tratamento deste efluente, devido à elevada carga orgânica, pode ser utilizado um sistema de tratamento anaeróbio, sendo os reatores UASB com mais notoriedade atualmente. Além disso, a digestão anaeróbia da matéria orgânica gera como produto o biogás, rico em metano, que tem potencial para ser uma fonte alternativa de energia. O presente trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no reator UASB de uma indústria cervejeira. Como resultado, o estudo mostra-se técnica e economicamente viável. Do ponto de vista ambiental, a recuperação do biogás permite uma redução na emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Do ponto de vista econômico, o investimento em geração de energia elétrica a partir do biogás apresenta um retorno financeiro elevado.

ABSTRACT

Brazil is one of the largest consumers of beer pop in the world. The high consumption of these drinks also represents a high production of wastewater. For the treatment of this wastewater, due to the high organic load, an anaerobic treatment system can be used, with the UASB reactors having more notoriety today. In addition, the anaerobic digestion of organic matter generates biogas, rich in methane, as a product, which has the potential to be an alternative source of energy. This study aimed to analyze the technical and economic feasibility of implementing an electricity generation system from biogas produced in the UASB reactor at brewing industry. As a result, the study proves to be technically and economically viable. From an environmental point of view, the recovery of biogas allows a reduction in the emission of greenhouse gases into the atmosphere. From an economic point of view, the investment in electricity generation from biogas has a high financial return.

Palavras-chave: biogás, reator UASB, produção de energia, viabilidade econômica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.	14
Figura 2: Esquema representativo de um reator UASB.	18
Gráfico 1: Médias mensais da vazão afluyente dos despejos industriais e volume de biogás produzido.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.	16
Tabela 2: Variação do poder calorífico de acordo com a composição do biogás.....	21
Tabela 3: Dados fornecidos pela ETDI sobre despejos industriais.	33
Tabela 4: Estatística descritiva da vazão afluyente e do volume de biogás da ETDI.....	35
Tabela 5: Potencial energético a partir da produção de biogás.....	35
Tabela 6: Tarifas de energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta da CPFL Paulista.	36
Tabela 7: Custos no primeiro ano com equipamentos e operação do sistema de geração de energia.	38
Tabela 8: Fluxo de caixa e VPL para um horizonte de 20 anos.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Por cento
APU	<i>Airborne Power Units</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
DAAE	Departamento Autônomo de Água e Esgoto
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
ETDI	Estação de tratamento de despejos industriais
h	Horas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kwh	Quilowatt-hora
L	Litros
m ³	Metro cúbico
mg	Miligrama
mm	Milímetro
MWh	Megawatt-hora
Nm ³	Normal metro cúbico
°C	Graus Celsius
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
pH	Potencial hidrogeniônico
R\$	Reais
SST	Sólidos suspensos totais
TIR	Taxa interna de retorno
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
VPL	Valor presente líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivos Gerais	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Reatores Anaeróbicos	13
3.1.2 Reatores UASB	16
3.2 Biogás	18
3.2.1 Formação do Biogás	18
3.2.2 Biogás e o efeito estufa	19
3.2.3 Geração de energia a partir do biogás	20
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
5 METODOLOGIA	24
5.1 Obtenção dos dados	26
5.2 Estimativa do volume de biogás produzido no reator UASB	26
5.3 Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás	27
5.4 Estimativa do benefício obtido pela implantação do sistema de geração de energia a partir do biogás	28
5.5 Estimativas dos custos de aquisição dos equipamentos para o sistema de geração de energia a partir do biogás	29
5.6 Estimativas dos custos de operação e manutenção dos equipamentos para o sistema de geração de energia a partir do biogás	29
5.7 Estimativas dos custos com os operadores dos equipamentos para o sistema de geração de energia a partir do biogás	30
5.8 Estimativas dos custos de depreciação dos equipamentos para o sistema de geração de energia a partir do biogás	30
5.9 Análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de geração de energia a partir do biogás	31
5.9.1 Payback	31
5.9.2 Valor Presente Líquido	31
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
6.1 Quantificação do volume de biogás produzido no reator UASB	33
6.2 Potencial energético gerado no reator UASB	35

6.3 Análise da viabilidade econômica.....	36
6.3.1 Payback	38
6.3.2 Valor Presente Líquido (VPL)	39
7 CONCLUSÃO	41
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se por ser um dos maiores consumidores de cervejas e refrigerantes do mundo, cujo consumo é inferior apenas ao dos Estados Unidos e da China. Em 2011, o consumo total dessas bebidas ultrapassava 550 milhões de hectolitros, dos quais o consumo de cerveja representava 43% deste total (CERVIERI JÚNIOR et al., 2014).

A indústria brasileira de bebidas destaca-se também por apresentar o segundo maior crescimento, entre as indústrias de transformação, no número de pessoas ocupadas entre 2009 e 2018. De acordo com IBGE (2020), houve um aumento de 28,1% nesse número, ficando atrás apenas das indústrias de manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos, cujo aumento foi de 27,9%.

A indústria de bebidas encontra-se amplamente distribuída por todo território brasileiro. Em geral, as condições hidrográficas do Brasil facilitam a instalação dessas plantas industriais: a água é um dos principais insumos para produção de bebidas, e o fácil acesso a suas fontes, no Brasil, permite que a localização geográfica das indústrias de bebidas seja próxima a seus mercados consumidores (CERVIERI JÚNIOR et al., 2014). No que tange às indústrias de cerveja, em 2019, havia um total de 1.209 cervejarias registradas em todas as Unidades da Federação (com exceção do estado do Acre). A maior concentração desses estabelecimentos ocorre nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, e São Paulo é o estado com o maior número de registro de cervejarias, representando 20% do total. Nos últimos 5 anos, o crescimento do número desses estabelecimentos apresentou uma taxa média de 36,4% em todo o país (MÜLLER & MARCUSSO, 2020).

Além de capacidade produtiva, o setor investe constantemente na busca por ganhos de produtividade, dado que as tecnologias presentes nas fábricas de bebidas estão, de modo geral, em estágio maduro. Nesse tema, as principais fronteiras de avanço estão na eficiência térmica, na diminuição de consumo de água e na redução de emissões de efluentes e CO₂ (CERVIERI JÚNIOR, 2017).

O aumento do consumo de bebidas representa também um significativo aumento na produção de águas residuárias. Essas águas residuárias podem causar a poluição dos corpos d'água se forem lançadas sem tratamento, isto porque possuem altas cargas

orgânicas devido às grandes vazões de descarte, mesmo que as concentrações de matéria orgânica sejam relativamente baixas (KATO, 1994 apud. ROCHA, 2003, p. 6).

Para o tratamento deste efluente, em geral, utiliza-se um sistema de tratamento biológico (que pode ser anaeróbio, aeróbio ou ainda, integrado), precedido de um pré-tratamento, cujo objetivo principal é a neutralização do pH. O lodo gerado no final deste tratamento também precisa de uma destinação final ambientalmente adequada (SANTOS & RIBEIRO, 2005).

Em reatores anaeróbios, entre 70% e 90% da matéria orgânica é convertida biologicamente em biogás (CHERNICHARO, 2007). Os principais componentes do biogás são o metano e o gás carbônico, os quais também são os principais responsáveis pelo efeito estufa e, conseqüentemente, pelo aquecimento global. Portanto, unindo o fato de a liberação desses gases proporcionarem impacto ambiental ao elevado poder calorífero agregado ao biogás, o reaproveitamento desse composto se torna bastante atraente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento para geração de energia elétrica do biogás produzido na Estação de Tratamento de Resíduos Industriais (ETDI) com sistema de reator UASB da cervejaria em questão.

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar o potencial de geração de biogás no reator UASB a partir de dados de vazão e carga orgânica dos resíduos industriais da ETDI da cervejaria;
- Comparar as estimativas do potencial de geração de biogás com os dados fornecidos pela ETDI da cervejaria;
- Estimar o potencial de geração de energia elétrica, a partir do biogás do reator UASB da ETDI da cervejaria;
- Analisar a viabilidade técnica da implantação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás da cervejaria;
- Analisar a viabilidade econômica da implantação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás, por meio dos indicadores *Payback* e Valor Presente Líquido da cervejaria.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, são apresentadas as principais fundamentações teóricas que permeiam este trabalho.

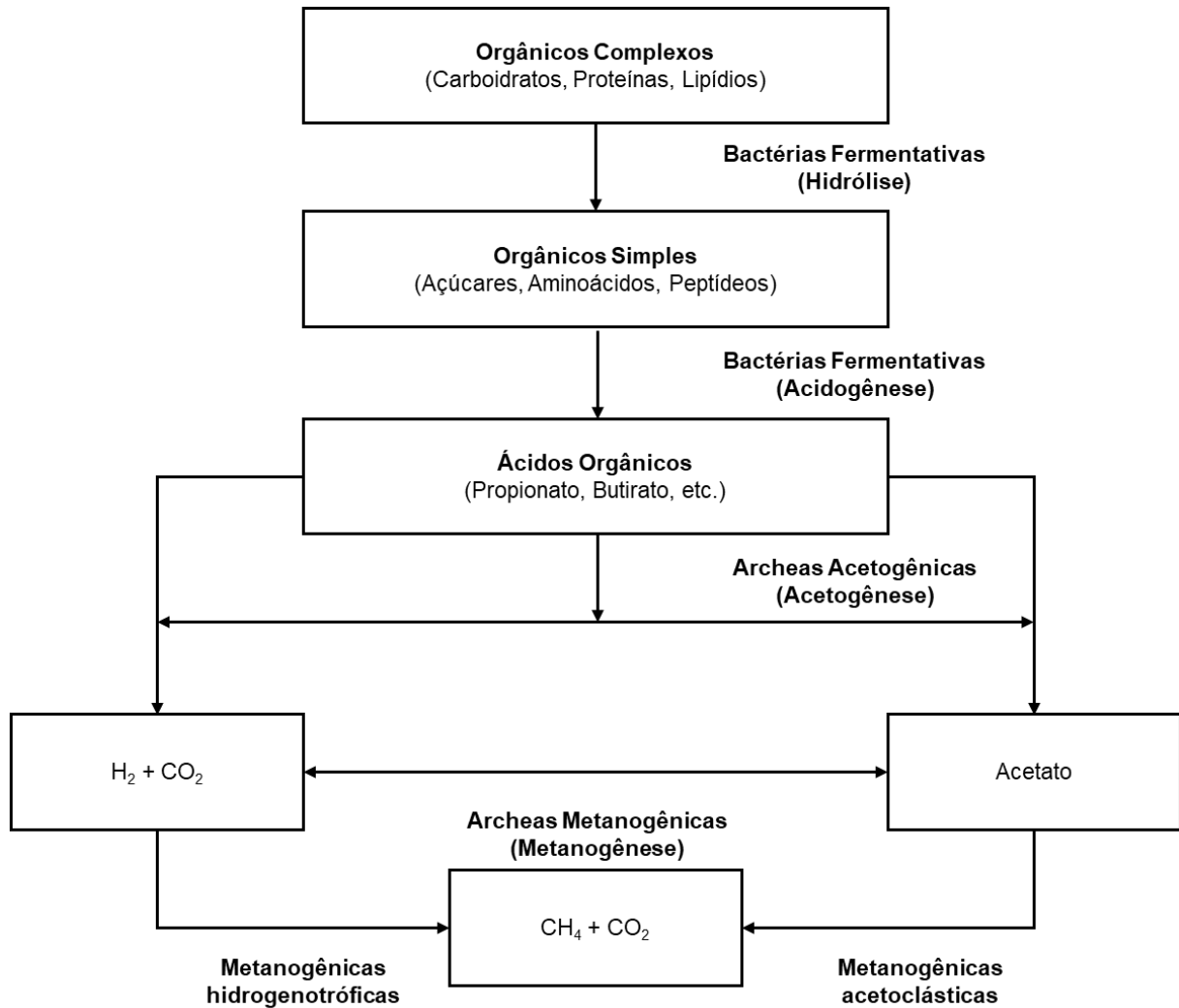
3.1 Reatores Anaeróbicos

Reatores anaeróbios são unidades de tratamento de efluentes que degradam a matéria orgânica através da ação de microrganismos na ausência de oxigênio. Este processo, conhecido como digestão anaeróbia, ocorre naturalmente e os reatores anaeróbios basicamente reproduzem este processo biológico de forma artificial.

A digestão anaeróbia é um processo em que microrganismos, mediante condições controladas de operação, realizam a conversão biológica da matéria orgânica complexa em compostos químicos mais simples, cujo principal produto obtido é o gás metano (CHONG & CHONG, 2008 apud SOARES et al., 2017).

Este processo divide-se em quatro fases principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos que podem requerer diferentes condições ambientais (KUNZ et al., 2019). A Figura 1 esquematiza as sequências destas etapas.

Figura 1: Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.



Fonte: CHERNICHARO (2007).

A hidrólise ocorre através da ação de enzimas extracelulares excretadas por bactérias hidrolíticas, polímeros (compostos de alta massa molecular, tais como lipídios, carboidratos e proteínas) são convertidos em monômeros solúveis (substâncias mais simples). O substrato envolvido na etapa de hidrólise influencia diretamente na velocidade global da reação de degradação, isto porque o tempo de duração da hidrólise varia de acordo com o substrato, podendo durar poucas horas para carboidratos e alguns dias para proteínas e lipídios (KUNZ et al., 2019).

Os produtos solúveis da etapa anterior são utilizados na etapa de acidogênese, como substrato por diferentes bactérias fermentativas acidogênicas, sendo convertidos em substâncias mais simples, como ácidos graxos voláteis de cadeia curta, álcoois, ácido láctico, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio, amônia e dióxido de carbono, além de novas células bacterianas (KUNZ et al., 2019; SOARES et al., 2017).

Em seguida, na etapa de acetogênese, bactérias acetogênicas oxidam os produtos da fase acidogênica, transformando-os em um substrato apropriado aos microrganismos metanogênicos. Os principais produtos gerados nesta etapa são o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Pode-se dizer que esta é uma etapa intermediária, cujo substrato dos microrganismos metanogênicos é produzido pela ação das bactérias acetogênicas (CHERNICHARO, 2007).

A etapa final do processo de degradação anaeróbia, a metanogênese, é a responsável direta pela produção de metano e dióxido de carbono e ocorre em condições estritamente anaeróbias. As bactérias metanogênicas são divididas em dois grupos principais, de acordo com a sua afinidade pelo substrato e extensão da produção de metano: as metanogênicas acetilásticas produzem metano a partir do ácido acético ou metanol, e as metanogênicas hidrogenotróficas produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007).

Caso haja presença de sulfato ou sulfeto nas águas residuárias de um reator, esses compostos podem ser utilizados por bactérias redutoras de sulfato como receptores de elétrons liberados durante a oxidação de materiais orgânicos. O metabolismo destas bactérias em reatores anaeróbios é importante, principalmente pelo produto final formado, o sulfeto de hidrogênio. Além disso, as bactérias redutoras de sulfato competem com microrganismos fermentativos acetogênicos e metanogênicos pelo substrato disponível, reduzindo a produção de metano no reator (CHERNICHARO, 2007).

Todos os compostos orgânicos podem ser degradados por um processo anaeróbio, que é mais eficiente e econômico quando o resíduo é facilmente biodegradável. Os reatores anaeróbios possuem diversas características favoráveis, em especial, são passíveis de serem operados com elevados tempos de retenção de sólidos e baixíssimos tempos de

detenção hidráulica, conferindo, dessa forma, grande potencial para serem aplicados em tratamentos de águas residuárias de baixa concentração.

Dentre as vantagens de seu uso, reatores anaeróbios apresentam baixo custo de implementação, baixo consumo de energia elétrica para a operação, baixa demanda de espaço, tolerância a elevadas cargas orgânicas e a possibilidade de preservação da biomassa sem alimentação do reator (CHENICHARO, 2007). A Tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens quanto a utilização de reatores anaeróbios.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.

Vantagens	Desvantagens
baixa produção de sólidos em relação aos processos aeróbios;	as bactérias anaeróbias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos;
baixo consumo de energia;	a partida do processo pode ser lenta na ausência de lodo de semeadura adaptado;
custos operacionais mais baixos;	alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária;
baixa demanda de área;	a bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas;
baixos custos de implantação;	possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis;
produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico;	possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável;
possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses;	remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatória.
tolerância a elevadas cargas orgânicas;	
aplicabilidade em pequena e grande escala;	
baixo consumo de nutrientes.	

Fonte: CHENICHARO (2007).

3.1.2 Reatores UASB

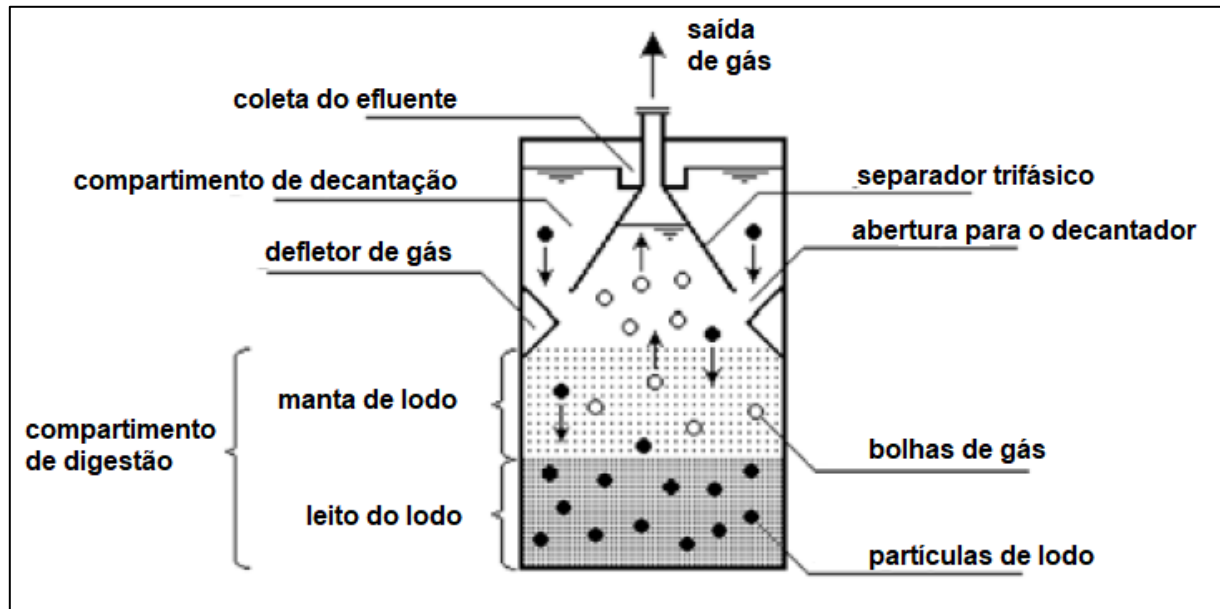
No âmbito dos sistemas de tratamento de esgoto, o tratamento anaeróbio, especificamente os reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), está cada vez mais

ocupando uma posição de destaque. Tal situação se dá por diversos motivos, mas principalmente por se tratar de um sistema simples de tratamento com o baixo custo, baixa produção de lodo, tolerância a elevada quantidade de carga orgânica e por produzir biogás com um alto teor calorífero (CHERNICHARO, 2007).

Muitos autores dividem o reator UASB em duas partes: a da digestão e a da sedimentação, conforme Figura 2. O afluente adentra o sistema pela parte inferior em fluxo ascendente e atravessa uma camada de lodo. A parte inferior dessa camada é denominada de leito de lodo, que é constituído por partículas mais densas, com diâmetro de 1 a 5 mm, e de maior atividade, enquanto a parte superior, denominada de manta de lodo, possui partículas mais leves, dispersas e com menor atividade (CHENICHARO, 2007). Essa camada de lodo consiste na zona da digestão, tal nome se dá pelo fato de a degradação da matéria orgânica ocorrer nessa zona.

Na parte superior do reator existe um separador trifásico. Esse separador é responsável pela separação dos gases contidos na mistura líquida e pela manutenção do lodo dentro do reator (CAMARGO, 2016). Na parede do reator, próximo ao separador trifásico, existe o defletor de gases, para que apenas o efluente e partículas sólidas passem por esse caminho. O material então atinge a zona de sedimentação. Esse local é caracterizado por baixas turbulências para que as partículas sólidas sedimentem e voltem para a zona de digestão. Na lateral de cima do reator existe um orifício para a saída do efluente (CHENICHARO, 2007).

Figura 2: Esquema representativo de um reator UASB.



Fonte: CHENICHARO (2007).

O lodo no interior do reator tende a crescer ao longo do tempo, se não houver descarte. Consequentemente, o aumento da concentração de lodo resulta em um aumento não desejado da concentração de SST, DBO e DQO no efluente tratado. Dessa forma, deve-se realizar periodicamente o descarte do lodo, de acordo com os parâmetros do projeto. Em geral, o lodo em excesso está bem estabilizado, podendo ser enviado diretamente para a desidratação (JORDÃO & PESSOA, 2005).

Em geral, projetos bem dimensionados de reatores UASB conseguem obter um efluente com eficiência média na ordem de 65% de remoção de DQO e de 70% de remoção de DBO (JORDÃO & PESSOA, 2005).

3.2 Biogás

3.2.1 Formação do Biogás

O biogás é um dos principais produtos obtidos pela digestão anaeróbia da matéria orgânica. Consiste em uma mistura de gases, cuja composição é variável, pois depende do tipo de substrato e das condições em que foi gerado. De forma geral, o biogás contém entre 50 e 70% de gás metano, entre 25 a 50% de dióxido de carbono e traços de outros

gases, como vapor d'água, gás hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, gás oxigênio, entre outros (ROHSTOFFE, 2010).

Trata-se de uma mistura gasosa combustível, incolor, inodoro e insolúvel em água. Este gás pode ser proveniente da decomposição de resíduos sólidos ou líquidos, de origem rural, urbano ou industrial, como também pode ser produzido naturalmente em pântanos, mangues, lagos e rios (LIMA & PASSAMANI, 2012).

3.2.2 Biogás e o efeito estufa

As concentrações de gás metano tem aumentado consideravelmente na atmosfera nas últimas décadas (CETESB, 2006). Fortes evidências científicas apontam que o aumento da concentração de determinados gases na atmosfera, entre eles o metano, é a causa direta da intensificação do efeito estufa (FRONDIZI, 2009). Isto porque o metano (e outros gases do efeito estufa) possui a capacidade de reter parte da radiação ultravioleta que provém dos raios solares, que deveria ser dissipada ao espaço, elevando a temperatura média da superfície da terra. O potencial de aquecimento global do metano é pelo menos 21 vezes superior ao do dióxido de carbono, que é adotado como referência (ICLEI, 2010).

Diversas iniciativas mundiais demonstram a necessidade de se reduzir as emissões dos gases de efeito estufa para garantir o equilíbrio ambiental às próximas gerações, tais como o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris, em que os países signatários se comprometem em reduzir seus respectivos índices de emissão dos gases de efeito estufa. Por conta disso, a recuperação do biogás tem sido discutida, com o intuito de mitigar impactos ambientais. A energia que é liberada pela queima do metano contido no biogás é extremamente útil às necessidades humanas, seja pelo uso direto do calor ou pela sua transformação em outras formas de energia, como em energia elétrica, energia cinética, entre outras (ICLEI, 2010).

O biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos sólidos ou líquidos constitui uma fonte de energia alternativa, bem como contribui em muito na questão ambiental, pois reduz potencialmente os impactos ambientais da fonte

poluidora. [...] O potencial energético do biogás é em função da sua quantidade de metano, o que determina o seu poder calorífico (SALOMON & LORA, 2005).

3.2.3 Geração de energia a partir do biogás

Os primeiros países que utilizaram o biogás como fonte de energia foram a China e a Índia. O biogás produzido a partir de restos de alimentos e dejetos no geral em biodigestores era utilizado na iluminação e cocção principalmente nas áreas rurais. Com o aumento do preço da energia na década de 70, em decorrência da crise do petróleo, surgiu a necessidade de utilizar novas fontes de energia, o que deu início a pesquisas sobre como otimizar o processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica (GOMES, 2019; KARLSSON et al., 2014).

No Brasil, o primeiro biodigestor foi instalado em novembro de 1979 na Granja do Torto em Brasília, cujo objetivo era produzir biogás e biofertilizante através de um biodigestor modelo chinês. Foi a partir da crise do petróleo, porém, que o Brasil começou a investir em biodigestores. O Programa de Mobilização Energética – PME, com início em 1980, utilizou-se de diversas formas de estímulo à instalação de biodigestores para geração de energia elétrica, principalmente através da concessão de estímulos materiais, como financiamentos e doação de recursos necessários à instalação e, em 4 anos, haviam mais de 3000 biodigestores instalados no país. No entanto, a falta de tecnologia e de manejo adequado fizeram com que os equipamentos comesçassem a falhar, levando diversos agricultores a abandonar essa prática (PALHARES, 2008).

A partir dos anos 2000, com o tratado internacional conhecido como Protocolo de Quioto, que propôs medidas mais rígidas para a emissão de gases de efeito estufa, o estímulo à produção de energia elétrica a partir do biogás voltou a crescer. Os biodigestores voltaram a ser utilizados, tanto nas áreas rurais, quanto em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (GOMES, 2019).

O potencial energético do biogás está associado à energia química nele acumulada. Isso acontece, porque o biogás é majoritariamente composto por metano, uma substância inflamável, inodora, incolor, com densidade menor que a do ar e com poder calorífico inferior igual a 50 MJ/kg (SILVEIRA et al., 2015).

O poder calorífico é a quantidade de energia liberada na oxidação de um combustível por unidade de massa. Os combustíveis no geral, inclusive o metano, são compostos por carbono, hidrogênio e oxigênio. Na reação de combustão dos mesmos, há a formação de água, que pode estar no estado líquido, gasoso ou ainda nos dois estados juntos. Caso a água formada na combustão sofra condensação, obtém-se um poder calorífico do combustível maior, porém, se a água estiver no estado gasoso, o poder calorífico será menor (OLIVEIRA, 2009).

Dessa forma, define-se como Poder Calorífico Superior (PCS) a quantidade de calor liberada pela queima de um combustível, de modo que a água proveniente desta queima esteja em estado líquido (volume constante), enquanto o Poder Calorífico Inferior (PCI) é a quantidade de calor liberado pela queima de um combustível, de modo que a água proveniente desta queima esteja em estado gasoso (volume variável) (LIMA, 2010).

Para o biogás, o poder calorífico está diretamente relacionado com a concentração de metano, visto que esta é a substância que possui poder calorífico relevante (BORGES, 2016). A Tabela 2 apresenta a variação do poder calorífico inferior do biogás em função da concentração de metano.

Tabela 2: Variação do poder calorífico de acordo com a composição do biogás

Composição Química do Biogás	Peso específico (kg/Nm ³)	Poder Calorífico Inferior	
		(kcal/kg)	(kcal/Nm ³)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43	856,07
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52	3.424,29
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98	5.136,46
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14	5.564,51
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01	6.420,59
95% CH ₄ , 5% CO ₂	0,7768	10.469,60	8.132,79
99% CH ₄ , 1% CO ₂	0,7268	11.661,02	8.475,23

Fonte: AVELLAR (2001) apud COSTA (2006). Adaptado.

A geração de energia elétrica a partir do biogás, portanto, ocorre em condições controladas, onde a energia química é convertida em térmica ou mecânica que, por sua vez, ativa um gerador que a converte em energia elétrica. Os motores de combustão interna (ciclo Otto) e as microturbinas a gás são as tecnologias mais utilizadas atualmente para este fim (ICLEI, 2010).

Os motores de combustão interna são máquinas que convertem energia térmica em energia mecânica pelo acionamento de pistões confinados em cilindros. Os motores de combustão interna (ciclo Otto), se acoplado a geradores, produzem eletricidade. Caso o calor gerado seja aproveitado, o processo é denominado de cogeração.

Já as turbinas são máquinas rotativas que geram energia a partir do escoamento de um fluido e, no caso das turbinas a gás, estas utilizam gás como fluido. São constituídas por compressor, câmara de combustão e turbina de expansão (ciclo Brayton). Ar comprimido é injetado na câmara de combustão, fornecendo oxigênio para a queima do combustível, transferindo a energia química do combustível para os gases, que se expandem na turbina devido ao aumento da temperatura, extraíndo assim a energia mecânica que pode ser convertida em energia elétrica. As microturbinas para geração de energia elétrica derivam da tecnologia utilizada para fornecer energia elétrica aos sistemas centrais de aviões quando estão no solo e com as principais turbinas desativadas, conhecida como APUs - *Airborne Power Units* (JORDÃO & PESSOA, 2005).

As principais tecnologias comerciais que utilizam esse tipo de gerenciamento são os motores de combustão interna, as turbinas a gás e as microturbinas. De forma simplificada, os motores de combustão interna tem melhor custo/benefício, mas são muito susceptíveis à corrosão; as turbinas a gás precisam de processos de operação mais bem controlados e consistentes e demandam altas pressões de funcionamento, o que as fazem ser relativamente mais caras; e as microturbinas são equipamentos de pequeno porte, o que as confere flexibilidade de instalação e operação. Elas fornecem melhores resultados de emissões, no entanto, são caras (USEPA, 2003 apud BORGES, 2016).

Para a utilização do biogás como combustível, é necessário remover certos contaminantes, principalmente a água, o sulfeto de hidrogênio e o dióxido de carbono, de forma a prevenir danos nos equipamentos de geração de energia (BORGES, 2016).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho é um estudo de caso de uma indústria cervejeira, a qual não terá sua identidade revelada, pois foi solicitado sigilo.

As principais atividades da cervejaria é a fabricação e o envasamento de cerveja. A indústria funciona em tempo integral, ou seja, 24 horas por dia e 7 dias da semana. Para isto, conta com um quadro de 200 funcionários contratados e mais cerca de 100 funcionários terceirizados fixos.

A cervejaria que produz em média 200.000 hectolitros de cerveja por mês, divide-se em seis áreas: a produção de cerveja, a utilidades (também conhecida como casa de máquinas), o envasamento, a manutenção, o controle de qualidade e o centro de distribuição.

O abastecimento de água da indústria é realizado através de três poços tubulares que captam água no Aquífero Guarani. A água é largamente utilizada como insumo da cerveja, no processo de fabricação e na limpeza das tubulações, dos equipamentos e das garrafas para envasamento da cerveja. O efluente gerado tanto de caráter industrial quanto doméstico é destinado a Estação de Tratamento de Despejos Industriais (ETDI) da própria cervejaria.

Na ETDI, primeiramente as águas residuárias passam por um gradeamento, para remoção de sólidos grosseiros. Em seguida, vão a caixa de areia para a separação dos sólidos sedimentáveis com alta capacidade de decantação. A vazão de entrada e saída da estação é medida de forma contínua através de uma Calha Parshall; o medidor indica a vazão instantânea em m^3/h e o volume de efluente gerado no período de um dia. É realizado, então, um gradeamento secundário mais restritivo. Todo afluente chega a um tanque de recebimento, que possui três bombas, que o conduzem para a parte alta da estação, onde localiza-se uma peneira rotativa, para mais uma remoção física de sólidos. Passa-se então, para um tanque de equalização e um tanque de acidificação, para homogeneizar e corrigir o pH do efluente, respectivamente.

A partir daí, começa o tratamento biológico, que consiste em um reator anaeróbio do tipo UASB. É nesta etapa onde ocorre a efetiva remoção da matéria orgânica. O biogás

produzido no reator é conduzido para um gasômetro pressurizador, com capacidade de 10m³. Após a passagem pelo gasômetro, o biogás é destinado ao *flare*, o qual é composto por três queimadores que operam de acordo com a produção de biogás e possui um sistema de ignição e supervisão de chama. O efluente gerado no reator é destinado ao tanque de oxidação, que tem por objetivo a oxidação química do sulfeto (evitando a formação de sulfeto de hidrogênio, responsável pelos maus odores em uma estação de tratamento de efluentes). Por fim, há um decantador secundário, que possui um raspador superficial de espuma e um raspador de lodo de fundo, ambos resíduos são destinados ao sistema de carregamento de lodo. A frequência da remoção do lodo de fundo é definida pelos operadores da estação, não permitindo acúmulos excessivos, pois pode acarretar produtos de fermentação indesejáveis.

Após o tratamento local, a licença de operação da cervejaria possibilita apenas a destinação do efluente na rede coletora da cidade. Estando autorizada o lançamento em corpo d'água somente o efluente pluvial.

Além disso, também é exigido na licença que o efluente atenda ao artigo 19 A do Regulamento da Lei Estadual de São Paulo n° 997/76. O referido artigo estabelece padrões de lançamento para a rede coletora da cidade. Para isso, mensalmente é realizado o monitoramento dos parâmetros exigidos no artigo. Ademais, semanalmente é realizada análises de nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, fósforo, óleos e graxas e sólidos sedimentados totais, todos do efluente final. Diariamente é realizada análise de DQO, acidez, alcalinidade e sólidos suspenso. E por fim, em tempo real é possível visualizar o pH, a temperatura e a vazão do efluente de entrada e saída da estação.

5 METODOLOGIA

5.1 Obtenção dos dados

Através da base de dados da ETDI, obteve-se os valores da média mensal, entre setembro de 2019 e setembro de 2020, das vazões afluentes e efluentes, além da DQO de entrada e de saída do reator UASB, o volume de biogás produzido e a sua composição (60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de outros gases).

5.2 Estimativa do volume de biogás produzido no reator UASB

Os valores reais medidos de produção mensal de biogás serão comparados com a metodologia proposta pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, 2012), que determina a vazão de metano produzida através da utilização da eficiência de remoção da DQO do tratamento. Para os fins desta monografia, descarta-se da equação o potencial do metano enquanto gás de efeito estufa, preocupando-se apenas em estimar a vazão do biogás produzido no reator UASB, sendo:

$$Q_{CH_4} = \frac{Q \times DQO \times \eta \times FCM \times FP_{CH_4} \times FCI}{\rho} \quad (1)$$

Onde:

Q_{CH_4} : vazão de metano produzido ($m^3/mês$);

Q : vazão média de águas residuais afluente ($m^3/mês$);

DQO : concentração de DQO afluente ($kgDQO/m^3$);

η : eficiência de remoção de DQO (%);

FCM : fator de correção de metano de acordo com o tipo de tratamento ($FCM = 0,8$);

FP_{CH_4} : fator de produção de metano ($FP_{CH_4} = 0,25kgCH_4/kgDQO$);

FCI : fator de correção devido às incertezas ($FCI = 0,89$);

ρ : densidade do metano ($\rho = 0,65 kg/m^3$).

Os valores utilizados para FCM , FP_{CH_4} e FCI estão de acordo com IPCC (2006). Além disso, utiliza-se a densidade do metano para converter as emissões de massa para volume (BORGES, 2016).

O biogás, porém, não é composto apenas por metano: dióxido de carbono e outros gases também o compõe. Dessa forma, é necessário adicionar um fator de correção à estimativa da UNFCCC (2012), que relaciona o volume de biogás produzido com o volume de metano produzido. O volume do biogás, portanto, é obtido através da equação, conforme BORGES (2006):

$$Q_{\text{biogás}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{C_{\text{CH}_4}} \quad (2)$$

Onde:

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

Q_{CH_4} : vazão de metano produzido ($\text{m}^3/\text{mês}$);

C_{CH_4} : concentração de metano no biogás ($C_{\text{CH}_4} = 60\%$).

5.3 Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás

A estimativa da energia elétrica produzida a partir do biogás, utilizando motor a combustão interna (ciclo Otto) acoplado a geradores, é feita através da equação:

$$P_{\text{GEE}} = \frac{\bar{Q}_{\text{biogás}} \times 12}{1000} \times \frac{\text{PCI} \times \eta_m \times \eta_g \times C_s}{C_{\text{kw}}} \quad (3)$$

Onde:

P_{GEE} : potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano);

$\bar{Q}_{\text{biogás}}$: vazão média de biogás ($\text{m}^3/\text{mês}$);

PCI: poder calorífico inferior do biogás ($\text{PCI} = 5136,46 \text{ kcal}/\text{Nm}^3$);

η_m : eficiência do motor (%);

η_g : eficiência do gerador (%);

C_s : coeficiente de segurança para correção de possíveis incertezas nos cálculos (94%);

C_{kw} : conversão de kcal para kWh ($860,421 \text{ kcal}/\text{kWh}$).

De acordo com JORDÃO & PESSOA (2005), a eficiência do motor (η_m) está na faixa de 30 a 42%. Para os fins deste trabalho, utiliza-se o menor valor, buscando manter um cenário conservador. Para o gerador, foi considerada uma eficiência (η_g) de 90%, de forma a contemplar eventuais perdas no sistema. Dessa forma, tem-se que a eficiência global do moto-gerador é de 27%.

5.4 Estimativa do benefício obtido pela implantação do sistema de geração de energia a partir do biogás

A energia elétrica gerada pelo moto-gerador será consumida apenas dentro das instalações industriais. Dessa maneira, o benefício obtido, em termos econômicos, está de acordo com CERVI et al. (2010) e BRITTO & ANDREO (2017), em função do potencial de geração de energia elétrica e da tarifa paga pela indústria. Para o cálculo da economia pela geração de energia elétrica, será utilizada a tarifa de energia elétrica da distribuidora CPFL Paulista, responsável pelo município onde se localiza a cervejaria em questão, ponderando-se o valor das tarifas do horário de ponta e horário fora de ponta. A tarifa de energia elétrica e o benefício econômico podem ser calculados de acordo com a equações:

$$T_{EE} = \frac{[(TUSD_p + TE_p) \times H_p] + [(TUSD_{fp} + TE_{fp}) \times H_{fp}]}{24} \quad (4)$$

$$BE = (P_{GEE} \times 1000) \times T_{EE} \quad (5)$$

Onde,

T_{EE} : tarifa final de energia elétrica (R\$/kwh).

$TUSD_p$: tarifa de uso do sistema de distribuição – horário de ponta (R\$/kwh);

TE_p : tarifa de energia elétrica no horário de ponta (R\$/kwh);

H_p : quantidade de horas do horário de ponta (horas);

$TUSD_{fp}$: tarifa de uso do sistema de distribuição – horário fora de ponta (R\$/kwh);

TE_{fp} : tarifa de energia elétrica no horário fora de ponta (R\$/kwh);

H_{fp} : quantidade de horas do horário fora de ponta (horas);

BE: benefício econômico com a geração de energia elétrica (R\$/ano);

P_{GEE} : potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano).

5.5 Estimativas dos custos de aquisição dos equipamentos para o sistema de geração de energia a partir do biogás

Para análise de viabilidade econômica sistema de geração de energia a partir do biogás, faz-se necessário estimar todo o custo de implantação deste sistema. Considera-se, para este trabalho, os custos relacionados à aquisição, operação e manutenção dos equipamentos, à folha salarial dos operadores e à depreciação dos equipamentos ao longo do tempo, conforme BRITO & ANDREO (2017) e GOMES (2019).

Os equipamentos necessários para o sistema de geração de energia estão descritos abaixo.

Purificador: os teores de sulfeto presentes no biogás precisam ser minimizados, de forma a evitar o desgaste do equipamento. Utilizou-se, para tanto, um purificador que opera num sistema de filtros.

Gasômetro: faz-se necessário utilizar um gasômetro para regular possíveis picos de vazão de biogás que adentra os equipamentos. Porém, a cervejaria já dispõe de um gasômetro em seu reator UASB. Dessa forma, o custo de sua aquisição será desconsiderado.

Painel de comando: O painel é utilizado para controlar os processos envolvidos na geração de biogás, sendo este instalado para controle e identificação de eventuais problemas.

Moto-gerador: Utilizou-se um conjunto de motor e gerador, responsável pela geração de energia elétrica a partir do biogás.

5.6 Estimativas dos custos de operação e manutenção dos equipamentos para o sistema de geração de energia a partir do biogás

Segundo SOUZA et al. (2004), os custos referentes à operação e manutenção representam, anualmente, cerca de 4% do investimento total no sistema de geração de energia. Dessa forma, podemos calculá-lo através da equação abaixo.

$$C_{om} = C_{eq} \times 0,04 \quad (6)$$

Onde,

C_{om}: custos de operação e manutenção (R\$);

C_{eq}: custo total dos equipamentos (R\$);

5.7 Estimativas dos custos com os operadores dos equipamentos para o sistema de geração de energia a partir do biogás

Está associado aos gastos com os profissionais responsáveis por operar o sistema de geração de energia.

$$C_{op} = [SMV + (SMV \times IE)] \times M \times F \quad (7)$$

Onde,

C_{op}: custos com operadores (R\$/ano);

SMV: salário mínimo vigente (R\$);

IE: impostos empregatícios (%);

M: meses trabalhados, considerando a legislação trabalhista (meses);

F: número de funcionários.

5.8 Estimativas dos custos de depreciação dos equipamentos para o sistema de geração de energia a partir do biogás

O custo com a depreciação dos equipamentos é calculado a partir da vida útil do grupo gerador de energia elétrica, através da equação abaixo.

$$Dep = \frac{C_{eq}}{V_{\text{útil}}} \quad (8)$$

Onde,

Dep: custo com depreciação dos equipamentos (R\$/ano);

C_{eq}: custo total dos equipamentos (R\$);

V_{útil}: vida útil do sistema (20 anos).

5.9 Análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de geração de energia a partir do biogás

Além do levantamento dos custos e benefícios envolvidos na implantação do sistema de geração de energia, faz-se necessário definir se os investimentos se mostrarão economicamente viável ao longo do tempo. O Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback* são indicadores comumente utilizados para determinar a viabilidade econômica de projetos, em particular, são esses os mais utilizados em projetos de Eficiência Energética (BIEZMA & SAN CRISTOBAL, 2006, apud BRITTO & ANDREO, 2017, p. 60). Para o presente trabalho, serão utilizados o *Payback* e o VPL para a análise de viabilidade econômica do projeto.

5.9.1 *Payback*

O *Payback* é um indicador que determina o prazo para que o valor investido seja recuperado (MARQUEZAN, 2006). Calcula-se o *Payback* através da equação:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Receita Anual}} \quad (9)$$

5.9.2 Valor Presente Líquido

O VPL pode ser definido como o valor das somas algébricas de fluxos de caixa futuros, os quais estão descontados a uma taxa de juros compostos adequada (MARQUEZAN, 2006). O VPL atesta a viabilidade de um projeto se este retornar um valor maior que zero ($\text{VPL} > 0$). Para isto, é necessário determinar o fluxo de caixa do projeto, através da diferença entre o benefício econômico com a geração de energia elétrica e os custos associados ao sistema durante o ano (operação e manutenção, com os operadores e com a depreciação dos equipamentos). Já para a taxa de desconto, utilizou-se o valor de 8%, conforme BRITTO & ANDREO (2017) e GOMES (2019).

Calcula-se o VPL segundo a equação:

$$\mathbf{VPL} = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{FC}_i}{(1+j)^i} \quad (10)$$

Onde,

VPL: valor presente líquido (R\$);

Io: investimento inicial (R\$)

FCi: fluxo de caixa para t = [1, 2, ..., n] (R\$);

i: período considerado (i = 1 a i = n) (anos);

j: taxa de desconto;

n: número de períodos do fluxo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Quantificação do volume de biogás produzido no reator UASB

Os dados fornecidos pela ETDI estão sistematizados na Tabela 3. Verifica-se os valores médios mensais das vazões de despejos industriais afluentes e efluentes, além dos valores de DQO médios mensais e a eficiência de remoção do reator UASB.

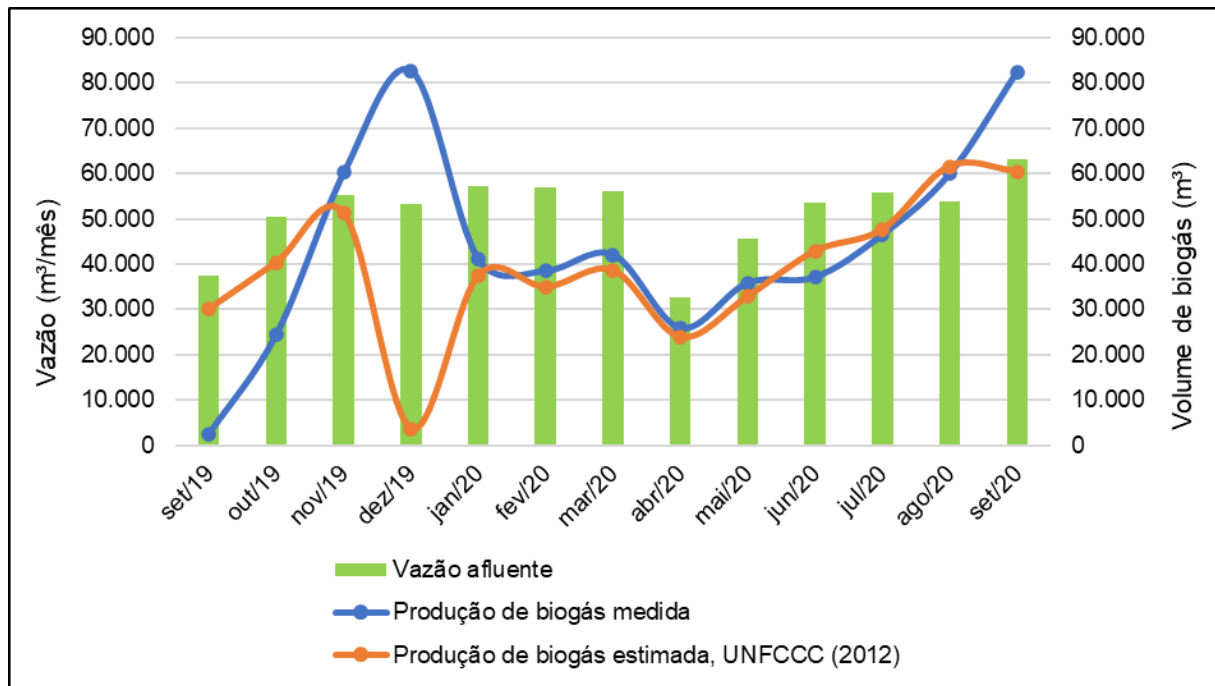
Tabela 3: Dados fornecidos pela ETDI sobre despejos industriais.

Mês	Vazão (m³/mês)		DQO (kgDQO/m³)		Eficiência de Remoção (%)
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
set-19	37.362,00	37.510,00	1,92	0,15	92,03
out-19	50.480,00	56.802,00	1,93	0,17	91,11
nov-19	55.187,00	62.831,00	2,23	0,20	91,22
dez-19	53.283,00	54.832,00	0,16	0,01	91,96
jan-20	57.351,00	58.020,00	1,59	0,16	90,03
fev-20	57.055,00	53.970,00	1,49	0,14	90,34
mar-20	56.104,00	58.258,00	1,66	0,16	90,54
abr-20	32.802,00	36.307,00	1,73	0,14	92,13
mai-20	45.661,00	48.188,00	1,69	0,11	93,41
jun-20	53.533,00	52.604,00	1,86	0,11	94,24
jul-20	55.967,00	50.027,00	2,08	0,22	89,64
ago-20	53.760,00	47.758,00	2,73	0,22	91,93
set-20	63.207,00	65.015,00	2,44	0,34	86,05

Fonte: Dados fornecidos pela cervejaria (2020).

As médias mensais da vazão afluente dos despejos industriais no reator UASB da ETDI, bem como os valores efetivamente medidos de produção de biogás e a estimativa com base na metodologia proposta pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, 2012) estão apresentadas no Gráfico 1.

Gráfico 1: Médias mensais da vazão afluyente dos despejos industriais e volume de biogás produzido.



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Observa-se, no gráfico, que no mês de dezembro de 2019, há uma discrepância acentuada entre os valores de volume de biogás efetivamente medido e o volume estimado. Tal fato ocorre pelos valores de DQO de entrada e de saída estarem muito abaixo quando comparado aos outros meses, fator que afeta diretamente no valor estimado de biogás. Considerando que o mês de dezembro é um dos meses de alta temporada de venda de cerveja, sendo assim de alta produção de cerveja, o volume de biogás tende a ser maior. Dessa forma, provavelmente o valor estimado de biogás está equivocado, porém não podemos dizer isso com certeza. Tal discrepância pode ser explicado por erros de calibração dos equipamentos, ou por falhas humanas. Dessa maneira, os cálculos estatísticos apresentados na Tabela 4 apresenta resultados considerando e desconsiderando os valores de dezembro de 2019.

Tabela 4: Estatística descritiva da vazão afluyente e do volume de biogás da ETDI.

	Período	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Vazão afluyente de despejos industriais (m³/mês)	total	51.673,23	8.433,83	32.802,00	63.207,00
	sem dez/19	51.539,08	8.794,35	32.802,00	63.207,00
Volume de biogás medido (m³)	total	44.566,69	22.505,84	2.500,00	82.716,00
	sem dez/19	41.387,58	20.229,38	2.500,00	82.413,00
Volume de biogás estimado (m³)	total	38.895,71	15.353,26	3.607,96	61.618,41
	sem dez/19	41.836,36	11.598,10	23.845,56	61.618,41

Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Comparando-se os dados do volume de biogás efetivamente medido e estimado, constata-se que o modelo proposto pela UNFCCC (2012) é preciso, mostrando que este método é útil para estimar a produção de biogás em reatores UASB, nos quais os resultados aproximados são razoáveis. Observa-se que o valor médio apresenta uma variação percentual de -12,7% com relação ao volume de biogás efetivamente medido – considerando o mês de dezembro de 2019 –, e uma variação percentual de aproximadamente 1,1%, se o mês de dezembro de 2019 for desconsiderado.

6.2 Potencial energético gerado no reator UASB

O potencial energético, obtido através da Equação 3, foi calculado para cada um dos períodos considerados na Tabela 4, e para o volume de biogás efetivamente medido e estimado. Os resultados, portanto, são expostos na Tabela 5.

Tabela 5: Potencial energético a partir da produção de biogás.

	Período	Vazão Média de Biogás (m³/mês)	Potencial Energético (MWh/ano)
Volume medido	total	44.566,69	810,28

Volume estimado (UNFCCC, 2012)	sem dez/19	41.387,58	752,48
	total	38.895,71	707,18
	sem dez/19	41.836,36	760,64

Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Para os cálculos de viabilidade econômica, utiliza-se a média desses valores, cujo resultado é de 757,65 MWh/ano.

6.3 Análise da viabilidade econômica

Os valores das tarifas de energia elétrica e do uso do sistema de distribuição de energia elétrica da CPFL Paulista, responsável pelo município que a cervejaria está localizada, estão relacionadas na Tabela 6. Esses dados foram obtidos a partir da conta de energia elétrica endereçada à cervejaria, em outubro de 2020. A partir desses dados, foi possível calcular o benefício econômico pela implantação do sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás, utilizando as equações 4 e 5.

Tabela 6: Tarifas de energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta da CPFL Paulista.

	Quantidade de horas (horas)	Tarifa USD (R\$/kwh)	Tarifa de Energia Elétrica (R\$/kwh)
Ponta	3	0,36534887	0,54073083
Fora de Ponta	21	0,3653495	0,3250975

Fonte: Dados fornecidos pela cervejaria (2020).

Assim sendo, obteve-se o valor de 0,717401088 R\$/kwh para a tarifa final de energia elétrica (T_{EE}). Além disso, utilizando-se da Equação 5, obteve-se que o benefício econômico pela implantação do sistema de geração de energia a partir do biogás, por ano, é de R\$ 543.538,93:

$$BE = (757,65 \times 1000) \times 0,717401088 = 543.538,93 \text{ R\$/ano}$$

Já com relação aos custos para a análise da viabilidade econômica, estes são divididos entre os custos relacionados à aquisição, operação e manutenção dos equipamentos, à folha salarial dos operadores e à depreciação dos equipamentos ao longo do tempo.

Para os custos de aquisição, devido as similaridades entre os estudos de caso, adotou-se os valores estipulados por BRITTO & ANDREO (2017), corrigidos pela calculadora cidadão do Banco Central, aplicando-se a taxa de IGP-M. Dessa forma, o custo total de aquisição dos equipamentos é estimado em, aproximadamente, R\$ 307.500,00. O custo de cada um dos equipamentos é detalhado abaixo:

- Purificador - adotado o valor de R\$ 2.770,26;
- Moto-Gerador - adotado o valor de R\$ 263.174,26;
- Painel de Comando - adotado o valor de R\$ 41.553,83.

Para os custos de operação e manutenção dos equipamentos, emprega-se a Equação 6:

$$C_{om} = 307.500,00 \times 0,04 = 12.300,00 \text{ R\$}$$

Este custo, no entanto, refere-se a toda vida útil do sistema gerador de energia. Para isto, utiliza-se o horizonte de 20 anos como vida útil do sistema, tendo, portanto, um custo anual de operação e manutenção de R\$ 615,00.

Como a ETDI e o moto-gerador trabalham continuamente, ou seja, 24 horas por dia, e o turno de cada um dos operadores é de 8 horas por dia, estima-se a necessidade de 4 funcionários para este setor. Em 2020, o salário mínimo vigente era de R\$ 1.045,00. A partir disto, considera-se 13 meses trabalhados (décimo terceiro salário) e a adição de 100% referente aos impostos empregatícios. Dessa forma, aplicando a Equação 7, temos o custo com os operadores:

$$C_{op} = [1.045 + (1.045 \times 100\%)] \times 13 \times 4 = 108.680,00 \text{ R\$/ano}$$

Por fim, os custos com a depreciação dos equipamentos são calculados com a Equação 8:

$$\text{Dep} = \frac{307.500}{20} = 15.375,00 \text{ R\$/ano}$$

O custo, por ano, para o pleno funcionamento dos equipamentos, portanto, é estimado em R\$ 124.670,00. A Tabela 7 sintetiza os custos relacionados ao sistema de geração de energia a partir do biogás em seu primeiro ano de operação.

Tabela 7: Custos no primeiro ano com equipamentos e operação do sistema de geração de energia.

Equipamento / Operação	Custo no primeiro ano
Purificador	R\$ 2.770,26
Moto-gerador	R\$ 263.174,26
Painel de comando	R\$ 41.553,83
Operação e manutenção	R\$ 615,00
Operadores	R\$ 108.680,00
Depreciação dos equipamentos	R\$ 15.375,00
SOMA	R\$ 432.168,35

Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Os custos com os equipamentos (purificador, moto-gerador e painel de comando) representam o investimento inicial do projeto, que totaliza R\$ 307.498,35. Ademais, os custos de operação e manutenção, com os operadores e com a depreciação dos equipamentos repetir-se-ão ao longo da vida útil do sistema. Desta forma, determina-se a viabilidade econômica do projeto pelo uso dos indicadores *Payback* e VPL.

6.3.1 Payback

Através da Equação 9, calcula-se o *Payback* (ou tempo de retorno) como sendo o quociente entre o investimento inicial do projeto (R\$ 307.498,35) e a receita anual, determinada pelo benefício econômico (R\$ 543.538,93). O *Payback*, portanto, apresenta o horizonte de tempo no qual o investimento inicial é recuperado:

$$\text{Payback} = \frac{307.498,35}{543.538,93} = 0,565 \text{ anos ou aproximadamente 7 meses}$$

Ou seja, em menos de um ano, é possível recuperar o investimento inicial aplicado no projeto.

6.3.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Para o cálculo de outro indicador de viabilidade econômica, o Valor Presente Líquido, faz-se necessário estabelecer um horizonte de projeto, pois este método de avaliação depende da previsão atual de fluxos de caixa futuros. Dessa forma, adota-se 20 anos, dado que esta é a vida útil estimada do moto-gerador.

Todos os cálculos foram realizados pelo Excel, com as taxas definidas anteriormente na metodologia. Além disso, estabeleceu-se que o fluxo de caixa é dado pela diferença entre o benefício econômico (R\$ 543.538,93) e os custos associados ao sistema durante o ano: operação e manutenção, operadores e depreciação dos equipamentos (R\$ 124.670,00). Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Fluxo de caixa e VPL para um horizonte de 20 anos.

Ano	Fluxo de Caixa	Juros 8%
0	-R\$ 307.498,35	
1	R\$ 418.868,93	R\$ 387.841,60
2	R\$ 418.868,93	R\$ 359.112,59
3	R\$ 418.868,93	R\$ 332.511,66
4	R\$ 418.868,93	R\$ 307.881,17
5	R\$ 418.868,93	R\$ 285.075,16
6	R\$ 418.868,93	R\$ 263.958,48
7	R\$ 418.868,93	R\$ 244.406,00
8	R\$ 418.868,93	R\$ 226.301,85
9	R\$ 418.868,93	R\$ 209.538,75
10	R\$ 418.868,93	R\$ 194.017,36
11	R\$ 418.868,93	R\$ 179.645,70
12	R\$ 418.868,93	R\$ 166.338,62
13	R\$ 418.868,93	R\$ 154.017,24
14	R\$ 418.868,93	R\$ 142.608,55
15	R\$ 418.868,93	R\$ 132.044,96

16	R\$ 418.868,93	R\$ 122.263,85
17	R\$ 418.868,93	R\$ 113.207,27
18	R\$ 418.868,93	R\$ 104.821,54
19	R\$ 418.868,93	R\$ 97.056,98
20	R\$ 418.868,93	R\$ 89.867,58
Soma		R\$ 4.112.516,90
VPL		R\$ 3.805.018,55

Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Como o VPL está acima de zero, e o fluxo de caixa fica positivo ainda no primeiro ano de operação do sistema (tal qual prevê o *Payback*) é possível dizer que o investimento no sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás é economicamente viável.

7 CONCLUSÃO

O biogás recuperado, quando utilizado como fonte alternativa de energia, além de reduzir a dependência de outras fontes, gera uma economia significativa para a indústria a qual está empregado. Do ponto de vista econômico, investir no sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás é viável, com retorno do investimento ainda no primeiro ano de operação do sistema, além de gerar uma economia nos gastos com energia elétrica de mais de R\$ 3.800.000,00 nos 20 anos de vida útil do sistema.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGES, Henrique Dantas. **Avaliação da produção de biogás gerado no reator UASB da estação de tratamento de esgotos sanitários Paranoá-DF**. Projeto Final em Engenharia Ambiental. Brasília - DF. 2016.

BRITTO, Marina Coutinho; ANDREO, Vitória Pontoglio. **Potencial energético do biogás de estação de tratamento de esgoto: avaliação das perspectivas técnica econômica**. São Carlos - SP. 2017.

CAMARGO, Bruno Martins de. **Comportamento de reator UASB sem separador trifásico no tratamento de esgoto sanitário**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2016.

CERVI, Ricardo G.; ESPERANCINI, Maura S.T.; BUENO, Osmar de C. **Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica**. Eng. Agríc, p. 831-844, 2010.

CERVIERI JÚNIOR, Osmar; TEIXEIRA JUNIOR, Job Rodrigues; GALINARI, Rangel; RAWET, Eduardo Lederman; DA SILVEIRA, Carlos Takashi Jardim. **O setor de bebidas no Brasil**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. 2014

CERVIERI JÚNIOR, Osmar. **Panoramas setoriais 2030: bebidas**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. 2017.

CHERNICHARO, Carlos Augustos de Lemos. **Anaerobic reactors**. IWA publishing, 2007.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Biogás: pesquisas e projetos no Brasil**. Governo de São Paulo, Secretaria de Meio Ambiente e CETESB. Organização de Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer. Responsável técnico: João Wagner Silva Alves. São Paulo. 2006.

COSTA, David Freire da. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. 2006.

FRONDIZI, Isaura Maria de Rezende Lopes. **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: guia de orientação-2009**. Imperial Novo Milênio. 2009.

GOMES, Ana Laura Campos. **Avaliação técnica e econômica do potencial energético do biogás proveniente da estação de tratamento de esgoto de São José do Rio Preto**. São Carlos - SP. 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual Empresa 2018 - PIA**. 2020.

ICLEI - Brasil - Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. Escritório de projetos no Brasil, São Paulo. 2010.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston, H.S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. IGES, Japan. 2006.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4ª edição. Rio de Janeiro, 2005.

KARLSSON, Tommy; KONRAD, Odorico; LUMI, Marluce; SCHMEIER, Nara Paula; MARDER, Munique; CASARIL, Camila Elis; KOCH, Fábio Fernandes; PEDROSO, Albari Gelson. **Manual Básico de Biogás**. Lajeado: Editora da Univates, 2014.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Empresa brasileira de pesquisa agropecuária - EMBRAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Concórdia - SC. 2019.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no Reator UASB da ETE-UFES**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória - ES. 106p. 2012.

LIMA, Edson Alves. **Alternativa para estimar o preço da madeira para energia**. Embrapa Florestas - Comunicado Técnico (INFOTECA-E). 2010.

MARQUEZAN, Luiz Henrique Figueira; BRONDANI, Gilberto. **Análise de investimentos**. Revista Eletrônica de Contabilidade, v. 3, n. 1, p. 35, 2006.

MÜLLER, Carlos Vitor; MARCUSSO, Eduardo Fernandes. **Anuário da Cerveja**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/SDA. 2020.

OLIVEIRA, Rafael Deleo. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2009.

PALHARES, J. C. P. **Biodigestão anaeróbia de dejetos suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Brasília, 2008.

ROCHA, Maria Aparecida Guilherme da. **Estudo da atividade metanogênica de lodos e da biodegradabilidade anaeróbia de efluentes de indústrias de bebidas**. Recife - PE. 2003.

ROHSTOFFE, Fachagentur Nachwachsende. **Guia prático do biogás: geração e utilização**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha, 2010.

SALOMON, Karina Ribeiro; LORA, Electo Eduardo Silva. **Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil**. Biomassa & Energia, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SANTOS, Mateus Sales dos; RIBEIRO, Flávio de Miranda. **Cervejas e refrigerantes**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. São Paulo. 2005.

SILVEIRA, Bruno; CHERNICHARO, Carlos Augustos de Lemos; CABRAL, Carolina; SUIDEDOS, Caroline; PLATZER, Christoph; SILVA; Gilson. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília, DF. Ministério das Cidades. 2015.

SOARES, Caroline Monique Tietz; FEIDEN, Armin; TAVARES, Sidnei Gregório. **Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás**. 2017.

SOUZA, Samuel Nelson Melegari de; PEREIRA, William Caldart; NOGUEIRA, Carlos Eduardo Camargo; PAVAN, André A.; SORDI, Alexandre. **Custo da eletricidade gerada**

em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. Acta Scientiarum Technology, v. 26, n. 2, p. 127-133, 2004.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). AMS-III.H. **Small-scale Methodology: Methane recovery in wastewater treatment** (version 16.0) Sectoral scope(s): 13, EB: 58. 2012.