

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

ANA LARA SANTOS DE OLIVEIRA

**Avaliação do potencial energético do biogás, produzido via digestão anaeróbia, do
efluente líquido de uma cervejaria artesanal**

Maceió
2021

ANA LARA SANTOS DE OLIVEIRA

Avaliação do potencial energético do biogás, produzido via digestão anaeróbia, do efluente líquido de uma cervejaria artesanal

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Coorientador: Msc. Gabryel Pontes Lima

Maceió
2021

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

O48a Oliveira, Ana Lara Santos de.
Avaliação do potencial energético do biogás, produzido via digestão anaeróbia, do efluente líquido de uma cervejaria tradicional / Ana Lara Santos de Oliveira. – 2021.

38 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientador: Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.

Coorientador: Gabryel Pontes Lima.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió.

Bibliografia: f. 36-38.

1. Indústria cervejeira. 2. Águas residuárias. 3. Energia. I. Título.

CDU: 62-665.9:663.4

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus e à Nossa Senhora das Graças por se fazerem presentes em minha vida, por clarearem meus pensamentos e me concederem forças e ânimo nos momentos de insegurança e de medo.

Aos meus pais, por todo o apoio e amor durante essa jornada. Vocês são partes fundamentais dessa conquista. Em especial, agradeço a minha irmã Joanna que sonhou e caminhou comigo. Obrigada por vibrar por cada pequena conquista, por ser alento nos momentos de dificuldade e por nunca ter me deixado só. Você tem todo meu amor.

À minha família que é tão especial e presente. Minha gratidão particular ao meu tio Manoel Messias, pelo apoio constante nessa etapa tão importante de minha vida.

Aos meus amigos Júlia, Letícia, Nicholas e Joel que sempre estiveram comigo, compartilhando afeto, amizade e um apoio tão necessário.

À Stephanie, por ser a irmã que eu ganhei nessa vida e por ser minha grande incentivadora. Obrigada por tanto amor e por tanto colo.

À Isadora Bastos, pela parceria em cada etapa desse trabalho, pela generosidade e por ser inspiração e motivação constantes. Trilhar esse caminho com você fez toda a diferença e tornou essa conquista ainda mais especial. Obrigada por não ter deixado eu esmorecer. É o nosso tão esperado momento!

À Carol Nonô, pela disponibilidade, paciência e ajuda na construção desse projeto.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Lucena, por ser tão generoso, tão solícito e por todos os ensinamentos. Obrigada pela atenção e pelo apoio durante todo o trabalho.

Ao meu co-orientador, Gabryel Pontes, às colegas Nadjane e Hamyne, pelo conhecimento compartilhado, pela disponibilidade e pelas dicas e reuniões valiosas.

À Vanessa Ribeiro e Isadora Rocha, minhas irmãs de apartamento, que dividiram comigo a experiência de sair cedo de casa e trilhar o próprio caminho. Em especial, obrigada à Vanessa pelas conversas nos dias “não tão fáceis” e pelo companheirismo de sempre.

Ao meu grupinho da faculdade, Lucas, Emanuel, JP, Larissa e Gamaliel, pela amizade e por tornar a rotina, por vezes árdua, mais leve e alegre.

À minha universidade pública, gratuita e, mundialmente referenciada: UFAL. Estudar numa universidade pública foi uma das experiências mais engrandecedoras e humanas da minha vida. Luta e resistência aos governos que ameacem a sua existência!

A todos que, de alguma maneira, fizeram parte dessa trajetória e contribuíram para a realização desse trabalho.

*“Todo caminho possui seus obstáculos e desafios.
O importante é não se esquecer de fazer escolhas
baseadas no amor que sentimos, não no medo.
E lembremo-nos sempre de que o caminho
vai sendo construído conforme caminhamos...”*

(Autor desconhecido)

RESUMO

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Brasil consolidou o crescimento do mercado cervejeiro, com mais de 1.000 abastecimentos legalmente instalados no ano de 2019. Nas cervejarias, a água é uma matéria-prima fundamental tanto no processo produtivo, sendo um dos principais ingredientes do produto final, quanto na limpeza e desinfecção de equipamentos. Como a maior parcela da água utilizada se torna um efluente com alta concentração de matéria orgânica e de sólidos suspensos, um dos desafios da indústria cervejeira é lidar com o tratamento desse resíduo, seja para a reutilização ou seja para o descarte adequado. Levando em consideração a elevada carga orgânica característica do efluente e a sua composição, a digestão anaeróbia desse efluente surge como uma alternativa de redução de carga orgânica e de produção de biogás. Dessa forma, o presente trabalho estudou, através da digestão anaeróbia, o potencial de uso do biogás gerado pelo efluente líquido de uma microcervejaria do estado de Alagoas, determinando a sua quantidade e sua produção de energia. Anualmente, são gerados cerca de 7.300 L de efluente resultante da purga de fermentação. Esse resíduo tem potencial de geração de metano, através da digestão anaeróbia, de cerca de 21,25 m³/mês. Além disso, a conversão do biogás em energia elétrica por turbinas, microturbinas e motor a gás produziu 23,97 a 40,75 kWh de energia anualmente. Outra alternativa energética, é o seu uso em caldeira ou ainda, após a sua purificação, como Gás Natural Veicular (GNV). Assim, é possível produzir energia com o resíduo da microcervejaria, ao passo que é feito o gerenciamento e o tratamento desse efluente, transformando assim, um passivo ambiental em um ativo energético.

Palavras-Chave: cervejarias, água residual, energia.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Processo produtivo da cerveja.....	14
Figura 2 - Etapas da digestão anaeróbia.....	17
Figura 3 - Fábrica de cerveja artesanal localizada em Maceió – AL.....	23
Figura 4 - Chiller industrial.....	28
Figura 5 - Equipamentos de refrigeração e iluminação da loja.....	28
Figura 6 – Engarrafora.....	29
Figura 7 - Caldeira para aquecimento do mosto.....	30

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Carga poluidora potencial de cada etapa do processo cervejeiro.....	16
Tabela 2 - Composição do biogás.....	19
Tabela 3 - Características do efluente líquido.....	20
Tabela 4 - Caracterização do efluente gerado na purga do fermento.....	24
Tabela 5 - Produção de cerveja e de efluente em 2020.....	27
Tabela 6 - Estimativa da produção e consumo de metano mensal.....	31
Tabela 7 - Estimativa do potencial e energia elétrica gerados por motores a gás.....	31
Tabela 8 - Estimativa do potencial e energia elétrica gerados por turbinas a gás.....	32
Tabela 9 - Estimativa do potencial e energia elétrica gerados por microturbinas a gás.....	32
Tabela 10 - Comparativo da produção de energia com o consumo mensal da cervejaria.....	32

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ARC	Água Residual de Cervejaria
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
DA	Digestão Anaeróbia
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GNV	Gás Natural Veicular
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
SINDICERV	Sindicato Nacional da Cerveja
VFA's	Ácidos Graxos Voláteis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 Geral	13
2.2 Específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Indústria cervejeira	14
3.1.1 Processo produtivo.....	14
3.1.2 Resíduos gerados pelo processo produtivo	15
3.2 Digestão anaeróbia	16
3.2.1 Hidrólise	17
3.2.2 Acidogênese	17
3.2.3 Acetogênese.....	17
3.2.4 Metanogênese	18
3.2.5 Sulfetogênese.....	18
3.3 Biogás	18
3.4 Produção de biogás a partir do efluente líquido de cervejarias	19
3.5 Tecnologias de geração de energia utilizando o biogás	21
3.5.1 Turbinas a gás.....	21
3.5.2 Microturbinas a gás.....	21
3.5.3 Motores a gás.....	21
3.5.4 Caldeiras.....	22
4. METODOLOGIA	23
4.1 Levantamento dos dados	23
4.2 Descrição da área de estudo	23
4.3 Caracterização dos resíduos	24

4.4	Estimativa da produção de metano e energia	24
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	Caracterização quantitativa do efluente	27
5.2	Consumo energético da cervejaria	27
5.3	Potencial de geração de energia a partir do biogás na cadeia de produção de cerveja.....	30
5.4	Soluções energéticas para a produção de cerveja	33
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

A indústria de bebidas brasileira é a terceira maior fabricante mundial com 13,3 bilhões de litros produzidos em 2016, ficando atrás somente de China e Estados Unidos que produziram, respectivamente, 46 e 22,1 bi de litros (SINDCERV, 2016). A contribuição para o alto potencial de crescimento desse setor deve-se, também, ao aumento da produção artesanal. Nos últimos 20 anos, o aumento do número de cervejarias se mostra constante, com uma taxa média de 19,6% ao ano (MAPA, 2019). Com isso, crescem as preocupações relacionadas com a gestão dos recursos hídricos, visto que para cada litro de cerveja produzida, são gastos entre 4,5 e 10 L de água (ARANTES, 2018).

Além de ser utilizada nas diversas etapas do processo, a água é empregada na desinfecção de equipamentos, na lavagem de pisos e no resfriamento. Essas operações levam à geração de grandes quantidades de águas residuais com altas cargas de matéria orgânica e sólidos suspensos, que requerem tratamento antes do lançamento em corpos d'água (ARANTES et al., 2017).

A relevante quantidade de resíduos gerados e a alta quantidade de matéria orgânica presente no efluente líquido, ambos característicos da produção cervejeira, são fatores necessários para que as indústrias possuam instalações que realizem processos de tratamento de seus efluentes, principalmente biológicos, devido às altas cargas de carbono e nitrogênio (ARANTES et al., 2017). Essas plantas contêm, geralmente, um pré-tratamento e um sistema de tratamento biológico que integra, muitas vezes, etapas anaeróbia e aeróbia (CETESB, 2005).

O efluente das cervejarias é oriundo das diversas fases do processo, sendo composto por resíduos dos insumos utilizados como levedura, malte, açúcares e etc. Em termos de volume, são gerados de 3 a 6 L de efluente líquido para cada 1 L de cerveja produzida (CETESB, 2005). Dessa forma, a necessidade de tratamento desse efluente para disposição final, aliada à sua composição e volume, torna a digestão anaeróbia uma alternativa de redução de carga orgânica e de geração de biogás.

Com esse cenário, a digestão anaeróbia se potencializa como uma alternativa viável no tratamento biológico de efluentes. Nos reatores anaeróbios, cerca de 70 a 90% da matéria orgânica é convertida em biogás, uma pequena quantidade de lodo é produzida e demanda menos energia. Além disso, o tratamento de resíduos biológicos é atrativo na indústria cervejeira, pois pode combinar o tratamento de águas residuais com seu uso para gerar recursos como energia química, que pode ser usado dentro da própria planta (ARANTES et al., 2017).

Nos últimos anos, são relatados na literatura trabalhos que mostraram a eficiência da digestão anaeróbia no tratamento de águas residuárias de cervejarias, utilizando diferentes condições de operação e resultando em altas taxas de remoção de carga orgânica (SIMATE et al., 2011; ARANTES, 2018; GAUDÊNCIO, 2013; CHEN et al., 2015). Percebe-se também, na literatura, que o processo produtivo da cerveja e a composição físico-química de seus resíduos são bem caracterizados, bem como os tratamentos para um lançamento de efluentes conforme a legislação ambiental. Entretanto, são escassos os estudos referentes à utilização desse efluente como único substrato para a produção de biogás, através da digestão anaeróbia, e quais são as influências dos parâmetros operacionais.

Dessa forma, o presente trabalho objetiva estudar a produção de biogás, via digestão anaeróbia, do efluente resultante da purga de fermento do processo produtivo da cerveja, avaliando a sua utilização como fonte de energia para suprir parcialmente a demanda da operação de uma microcervejaria. Além de proporcionar a redução de custos com energia, essa alternativa confere um destino sustentável ao efluente, diminui a quantidade de resíduos para disposição final e, por fim, reduz o potencial poluidor do efluente que é destinado ao esgoto.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o potencial do uso de biogás, produzido via digestão anaeróbia, do efluente líquido resultante da etapa de fermentação de uma indústria cervejeira para fins energéticos.

2.2 Específicos

- Determinar a quantidade de efluente líquido gerado no processo produtivo da cerveja em uma fábrica localizada em Maceió - AL;
- Analisar o consumo de energia elétrica da microcervejaria;
- Avaliar a oferta de energia do biogás;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Indústria cervejeira

A cerveja é uma das bebidas mais antigas do mundo. Há especulações que essa bebida foi descoberta em um processo de fermentação, não intencional, há cerca de 30 mil anos. Entretanto, é na Idade Média, no século XII, que os cervejeiros de origem germânica, ao incrementarem o lúpulo à cerveja, dão as características da bebida atual, composta por malte, água, fermento e lúpulo. No Brasil, a cerveja é introduzida após a chegada da família real em 1808 (DANTAS, 2016).

Além de possuir um valor cultural, a cerveja faz parte de um dos segmentos mais relevantes da economia brasileira, interferindo diretamente no desenvolvimento do país. Esse setor é responsável por 1,6% do PIB, apresenta destaque na geração de empregos e tem impacto em uma longa cadeia que vai desde o agronegócio ao pequeno varejo (CERVBRASIL, 2016).

Em 2019, foram registradas 320 novas cervejarias no Brasil, o que corresponde a quase uma nova cervejaria por dia no país. O estado de Alagoas é um dos que mais se destacam, apresentando um crescimento de 68% no número de estabelecimentos. Esse aumento do número de registros, que se mostra constante desde o ano de 1999, evidencia o movimento de um mercado que não tende a desacelerar (MAPA, 2019).

3.1.1 Processo produtivo

Os quatro ingredientes necessários para a produção de cerveja são: água, malte, lúpulo e levedura. Esse processo envolve várias etapas e, apesar de haver variações no processo em função das particularidades de cada planta industrial, é descrito de acordo com a Figura 1:

Figura 1: Processo produtivo da cerveja.



Fonte: Portal Química Nova Interativa (QNInt), (2019).

O processo se inicia com a obtenção de malte. Nessa etapa, os grãos de cereais são mergulhados na água para que comecem a germinar e se transformem em malte. Após uma semana, a germinação é interrompida e o grão passa por uma secagem em forno. Nessa fase de secagem, a cor do malte é determinante na definição de cor e de sabor da cerveja. O malte é então moído, assim, o amido encontrado em seus grãos são expostos e se quebram em várias moléculas por ação de enzimas (FERREIRA, 2016).

Depois da secagem, adiciona-se água quente ao malte, dando origem ao mosto, uma solução de açúcares oriundos da sacarificação do amido presente no malte. Após o preparo do mosto, o mesmo é então filtrado e, em seguida, é aquecido na caldeira de fervura. Esse processo inativa as enzimas, coagula e precipita as proteínas, concentra e esteriliza o mosto. Nessa etapa é adicionado o lúpulo (CETESB, 2005).

O mosto, já esterilizado, é encaminhado para o tanque de fermentação onde são adicionadas as leveduras e, nesse processo, os açúcares são transformados em álcool e gás carbônico (CO₂). Na fase seguinte, inicia-se o período de maturação. Nesse período, ocorrem mudanças no sabor, na cor e no aroma da cerveja (CERVEJA e MALTE, 2017).

Com o objetivo de remover partículas em suspensão, como leveduras, e substâncias de cor desagradável, a cerveja passa por um processo de filtração, que não altera a composição e o sabor da cerveja (ROSA et al., 2014). Após essa etapa, a cerveja passa por um processo de carbonatação, onde recebe gás carbônico (CO₂) e, posteriormente, é devidamente envasada.

3.1.2 Resíduos gerados pelo processo produtivo

A indústria cervejeira tem um elevado potencial gerador de resíduos em toda a sua cadeia produtiva. Os principais resíduos são: o bagaço de malte, o excedente de levedura e o efluente líquido. O bagaço de malte, gerado na etapa de filtração do mosto, é o principal subproduto do processo, em que são gerados de 14 a 20 kg a cada 100 L de cerveja produzida. São formados, também nessa etapa, de 2 a 4 kg de adicional de levedura a cada 100 L de cerveja (SANTOS, 2005).

Os efluentes líquidos são gerados tanto no processo produtivo da cerveja, quanto nas etapas de lavagem de garrafas, linhas e equipamentos como tubulações e filtros. Para cada 1 L de cerveja produzida, gera-se de 3 a 6 L de efluente líquido (CETESB, 2005). A alta carga orgânica contida na água residual faz com que esse efluente tenha um alto potencial de poluição.

Em relação à contribuição de cada uma das etapas do processo ao montante total de carga orgânica e resíduos não filtráveis (RNF), a Tabela 1 apresenta um exemplo de divisão de carga poluidora de cada etapa do processo (CETESB, 2005).

Tabela 1 - Carga poluidora potencial de cada etapa do processo cervejeiro.

Origem	DBO		RNF	
	kg/m ³ cerv.	%	kg/m ³ cerv.	%
Levedura excedente	3,71	30	2,55	30
Trub	3,21	26	1,24	14
Lúpulo	0,39	3	0,77	9
Licor dos grãos prensados	0,85	7	0,50	6
Lavagens	2,09	17	0,85	10
Efluente filtros	0,50	4	1,58	19
Envase	1,20	10	0,66	8
Outros	0,42	2	0,35	4
Total	120,4	100	8,50	100

Fonte: CETESB (2005).

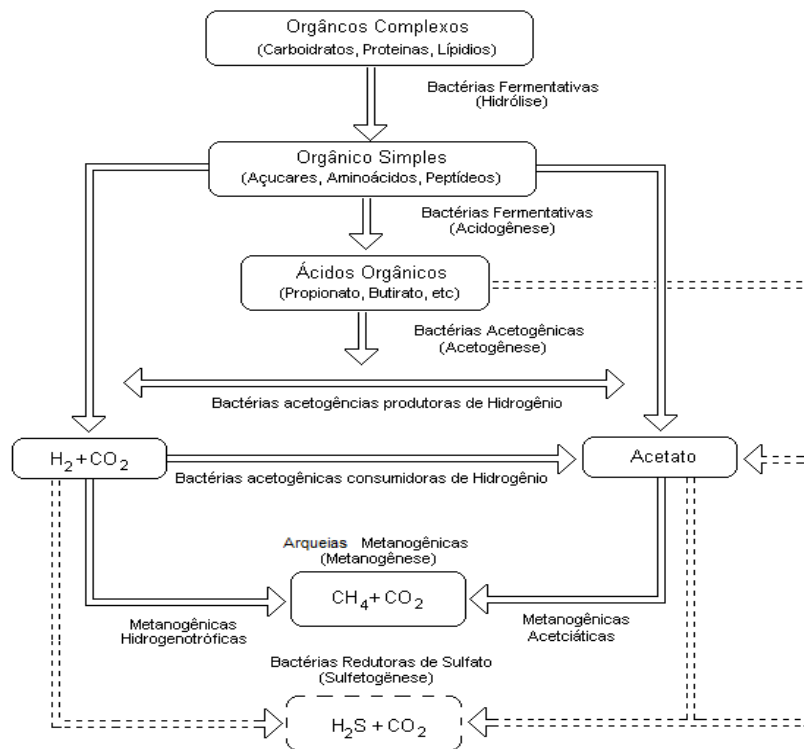
É possível observar que a levedura excedente, oriunda da etapa de fermentação, é responsável por conferir a maior fração de carga poluidora do processo cervejeiro. Apesar de ser uma etapa que gera menos do que 3% do volume total de efluente, é responsável, junto com a filtragem, pela maior parte da carga orgânica total (CETESB, 2005).

3.2 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser considerada um ecossistema em que, através da interação e atividade de microrganismos, a matéria orgânica complexa se converte em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. Apesar do processo ser considerado em duas fases (Figura 2), pode ser subdividido em quatro fases principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 1997).

No tratamento de águas residuárias, o sistema anaeróbio apresenta como vantagens, em comparação com o aeróbio, baixo consumo de energia, baixa geração de lodo e pequeno espaço requerido (GAUDÊNCIO, 2013).

Figura 2: Etapas da digestão anaeróbia.



Fonte: CHERNICHARO (1997).

3.2.1 Hidrólise

Na primeira fase da digestão anaeróbia, a hidrólise consiste em converter os materiais orgânicos complexos em materiais orgânicos mais simples, através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas. Alguns fatores que podem afetar o grau e a velocidade na qual o substrato é hidrolisado, são: temperatura operacional do reator, pH do meio e tamanho das partículas (Lettinga *et al.*, 1996).

3.2.2 Acidogênese

Nessa etapa, as bactérias fermentativas acidogênicas são responsáveis por degradarem os produtos da hidrólise, convertendo-os em ácidos graxos voláteis como o propiônico e butírico, álcoois e gás carbônico.

3.2.3 Acetogênese

As bactérias acetogênicas oxidam os produtos gerados na fase de acidogênese, produzindo ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Os compostos orgânicos produzidos são consumidos pelas bactérias metanogênicas da fase posterior.

3.2.4 Metanogênese

Nessa etapa, as bactérias metanogênicas degradam os compostos orgânicos, resultantes da acetogênese, em metano e dióxido de carbono. Essas bactérias são divididas em dois grupos: metanogênicas acetoclásticas e metanogênicas hidrogenotróficas. O primeiro grupo, que forma metano utilizando acetato, é responsável por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano. Já o segundo, utiliza hidrogênio e dióxido de carbono para produzir metano.

3.2.5 Sulfetogênese

Dependendo da composição química do efluente a ser tratado, digestão anaeróbia pode incluir uma fase adicional: a sulfetogênese. Durante esse processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto através de bactérias redutoras de sulfato. Quando o efluente apresenta o sulfato em sua composição, muitos dos compostos intermediários gerados na DA passam a ser utilizados pelas bactérias redutoras de sulfato. Assim, essas bactérias competem com as fermentativas, acetogênicas e metanogênicas pelos substratos disponíveis.

3.3 Biogás

O biogás é proveniente do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica, sendo composto majoritariamente por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2). Em menores proporções, são produzidos gases como nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2). Dependendo da eficiência da digestão anaeróbia, que é influenciada pelo tipo de substrato e por parâmetros operacionais, é possível produzir biogás com uma faixa de 50% a 70% de metano (PERLINGEIRO, 2014), como mostra na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição do biogás.

Gás	Concentração
Metano (CH ₄)	50% - 70% em volume
Dióxido de carbono (CO ₂)	25% - 45% em volume
Água (H ₂ O)	2% - 7% em volume
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	20 – 20000 ppm
Nitrogênio (N ₂)	< 2% em volume
Oxigênio (O ₂)	< 2% em volume
Hidrogênio (N ₂)	< 1% em volume

Fonte: SILVA (2017).

A presença significativa de metano na composição do biogás, possibilita a sua utilização como fonte de energia, permitindo seu uso para a geração de energia elétrica, produção de calor e na produção de biometano e de CO₂ (SILVA, 2017). Por ser uma fonte alternativa de energia, a utilização da produção de energia elétrica a partir do biogás apresenta vantagens socioambientais, ao gerar emprego, reduzir o consumo de combustível fóssil e de emissões de metano para a atmosfera, etc. (SALOMON, 2007).

3.4 Produção de biogás a partir do efluente líquido de cervejarias

A água residual de cervejaria (ARC) apresenta alta demanda química de oxigênio (DQO) oriunda de componentes orgânicos como açúcares, amido solúvel, ácidos graxo voláteis (VFA's) e etc. Pela quantidade e tipo de produtos químicos utilizados na limpeza e desinfecção (como soda cáustica, ácido fosfórico e ácido nítrico), os níveis de pH apresentam uma faixa de variação bastante significativa. O manuseio da matéria-prima, bem como o tipo de levedura utilizada influenciam nos níveis de nitrogênio e de fósforo presentes no efluente (SIMATE et al., 2011).

As principais características físico-químicas de ARC relatadas na literatura por Gaudêncio (2013), mostram que apesar de haver variações relevantes na composição, os efluentes geralmente possuem alta taxa de matéria orgânica e alto teor de sólidos em suspensão (Tabela 3).

Tabela 3 - Características do efluente líquido.

Parâmetro	Ahn et al. (2001)	Alvarado-Lassman et al. (2009)	Cronin e Lo (1998)	Oktem e Tufekçi (2006)	Simate et al. (2011)
DQO (mg.L ⁻¹)	920 - 1910	2083	600 – 5600	870 - 5065	2000 – 6000
DBO (mg.L ⁻¹)	720 - 1470	1375	750 – 3000	350 - 4200	1200 -3600
pH	6,3 - 7,0	10	4,0 - 12,0	5 - 11,2	3,0 - 12,0
Temperatura (°C)	-	-	-	-	18 – 40
NTK (mg.L ⁻¹)	16,4 - 36,5	116	300	13 - 50	25 – 80
Fósforo (mg.L ⁻¹)	5,3 - 12,5	4,8	-	1,75 - 7,20	10,0 - 50,0
SST (mg.L ⁻¹)	61 – 378	750	40-1000	190 - 970	2901 – 2000
SSV (mg.L ⁻¹)	43 – 200	-	40-600	-	-
N-amoniacal (mg.L ⁻¹)	3 - 11,5	13,3	-	1,12 - 5	-

NTK: Nitrogênio orgânico e amônia

Fonte: GAUDÊNCIO (2013).

A caracterização dos efluentes líquidos de cervejaria torna o tratamento indispensável para a disposição final, podendo ser realizado em sistema aeróbio e anaeróbio. Em comparação, a degradação da matéria orgânica em sistemas anaeróbios apresenta a vantagem de evitar a necessidade de aeração, resultando em baixo consumo de energia e baixa geração de lodo (CHEN et al., 2015).

De acordo com Arantes (2018), trabalhos realizados nos últimos anos sobre a digestão anaeróbia no tratamento de ARC mostram uma alta eficiência de remoção de DQO, entre 78 e 98%. Foram relatados teores de CH₄ entre 59 e 69%, uma característica típica deste bioprocessos. Ainda de acordo com o autor, são necessários estudos específicos para cada sistema a fim de determinar as condições ótimas de produção de biogás, em função da influência de variáveis

específicas e efeitos como particularidades do inóculo, presença de sanitizantes, presença de cianeto, dentre outros.

3.5 Tecnologias de geração de energia utilizando o biogás

Das tecnologias disponíveis para geração de energia elétrica utilizando o biogás, destacam-se as turbinas a gás, motores de combustão interna e microturbinas a gás, descritas a seguir.

3.5.1 Turbinas a gás

As turbinas a gás são máquinas que, em geral, pertencem ao grupo de máquinas térmicas geradoras e cuja gama de funcionamento vai de baixa potência (30 kW para microturbinas) até 500 MW (OLIVEIRA, 2015).

Esta topologia inclui desde um sistema de combustão direta, de baixa eficiência e altos níveis de emissão de carbono, até sistemas sofisticados, em combinações com menores índices de emissão de gases poluentes e mais eficientes. Pode ser integrada a sistemas com geração a partir da biomassa, radiação solar e hidroelétricas (BAGGIO, 2017). A desvantagem das turbinas de médio e pequeno porte, em relação a unidades maiores, está associada à limitação da temperatura de entrada (SANTOS, 2019).

3.5.2 Microturbinas a gás

São turbinas a gás com alta e variável velocidade de rotação na faixa de potência de 15 a 300 kW (SALOMON, 2007). Diferem-se, portanto, em relação à demanda para a qual são projetadas, e assim sua capacidade de geração, a capacidade de microturbina é reduzida comparada a turbina (BAGGIO, 2017). Essa tecnologia apresenta baixos índices de emissão de gases poluentes, opera com gases que possuem baixo teor de metano, entretanto, apresentam um custo por kW maior.

3.5.3 Motores a gás

São tecnologias que utilizam o biogás diretamente, não necessitando de um tratamento sofisticado do combustível. São importadas, com custos e manutenção mais elevados (SANTOS, 2019).

3.5.4 Caldeiras

Como alternativa energética, o biogás pode ser utilizado na produção de calor a fim de gerar vapor nas caldeiras. De acordo com Salomon (2017), para o uso do biogás em caldeiras, deve-se realizar algumas modificações como: níveis de controle de umidade do gás, revestimento do pré-aquecedor e da chaminé com material anticorrosivo, aumento da vazão de biogás, visto que este possui menor quantidade de metano que o gás natural.

4. METODOLOGIA

4.1 Levantamento dos dados

As informações utilizadas para a construção desse estudo foram fornecidas pela cervejaria através de visitas *in loco*, de entrevista com os responsáveis pelo processo produtivo da cerveja e com o proprietário da cervejaria. As informações referentes à caracterização do resíduo foram obtidas tanto da cervejaria em questão, quanto através de entrevista com o mestre cervejeiro de outra fábrica também localizada no município de Maceió.

4.2 Descrição da área de estudo

A coleta de dados para a quantificação do resíduo da purga de fermento foi efetuada numa microcervejaria artesanal de Alagoas (Figura 3), localizada no município de Maceió. Atualmente, a cervejaria produz sete estilos diferentes de chopps e cervejas que são produzidas num total de 6 tanques, sendo 2 tanques de 1.500 L e 4 tanques de 3.000 L.

Figura 3 – Fábrica de cerveja artesanal localizada em Maceió – AL.



Fonte: Site da empresa.

No ano de 2020, foram produzidos aproximadamente 95.500 litros de cervejas com destaque de produção para o estilo Pilsen. A cervejaria não tem um planejamento dos estilos de cerveja que serão produzidos semanalmente, sendo estes definidos pelo mestre cervejeiro que produz de acordo com a saída de cada estilo e baseando-se em sua experiência.

4.3 Caracterização dos resíduos

Os dados da caracterização do efluente descartado na purga, após a fermentação, foram obtidos a partir de um estudo de caso realizado em 2019. Esse efluente gerado ao final da etapa de fermentação, é também denominado de excedente de levedura.

Tabela 4 – Caracterização do efluente gerado na purga do fermento.

Análises	Pilsen	IPA
pH	5,26	5,47
DQO (mg/L)	170.649	267.789
Carboidratos (mg/L)	55.483	98.825
Sólidos Totais	103.490	98.825
Sólidos Fixos	13.703	13.753
Voláteis	89.786	13.753
NTK (mg/L)	4.830	6.533
N-Amoniacal (mg/L)	30.509	27.966
Fósforo (mg/L)	758,26	1.189

Fonte: Estudo de caso (2019).

Essa caracterização qualitativa não é referente ao efluente da cervejaria que esse estudo se baseia, mas do efluente de outra cervejaria localizada na mesma região. Ambas apresentam processos produtivos e composições do produto semelhantes.

4.4 Estimativa da produção de metano e energia

A expressão geral que determina a produção teórica de metano por grama de DQO removida é dada pela Equação 1 (CHERNICHARO, 1997):

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{k(t)} \quad (1)$$

Onde,

V_{CH_4} = volume de metano produzido (L)

DQO_{CH_4} = carga de DQO removida no reator e convertida em metano (gDQO);

$k(t)$ = fator de correção para a temperatura operacional do reator (gDQO/L);

O fator de correção, $k(t)$, é dado pela equação:

$$k(t) = \frac{p \cdot K}{R \cdot (273 + T)} \quad (2)$$

Onde,

p = pressão atmosférica (1 atm);

K = DQO correspondente a 1 mol de CH_4 , igual a 64 gDQO/mol;

T = temperatura operacional do reator ($^{\circ}\text{C}$);

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

A estimativa da quantidade de energia é determinada pela equação abaixo:

$$E_t = Q_{\text{biogás}} \cdot \text{PCI}_{\text{biogás}} \quad (3)$$

Onde,

E_t = energia térmica disponível no biogás (kcal/dia);

$Q_{\text{biogás}}$ = vazão média do biogás medida (m^3/dia);

$\text{PCI}_{\text{biogás}}$ = poder calorífico inferior do biogás (kcal/m^3);

Com a energia térmica calculada, determina-se a potencial elétrica que o biogás pode gerar, através da Equação 4:

$$PE_{\text{biogás}} = \frac{E_t \cdot 4,184 \cdot n_{\text{tec}} \cdot n_{\text{gerador}}}{86.400} \quad (4)$$

Onde,

$PE_{\text{biogás}}$ = potencial elétrico do biogás (kW);

4,184 = fator de conversão de “kcal” para “kJ”;

n_{tec} = eficiência da tecnologia de conversão;

n_{gerador} = rendimento do gerador;

86.400 = fator de conversão de dias para segundos;

Por fim, com o valor da potência elétrica do biogás, calcula-se a energia elétrica gerada:

$$E_e = PE_{\text{biogás}} \cdot T_{\text{operação}} \quad (5)$$

Onde,

E_e = energia elétrica gerada (kWh/dia);

$T_{\text{operação}}$ = tempo de operação do motor (h/dia);

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização quantitativa do efluente

O efluente resultante das purgas do fermento é gerado ao final da fermentação, etapa que gera um excedente de levedura que não será mais utilizado e será, portanto, descartado. Como esse efluente não recebe tratamento, não possui outra aplicação e, por ser descartado ao final do processo, não é quantificado em cada produção e em cada estilo de cerveja. A estimativa da cervejaria é que, em cada produção realizada, tem-se 1500 L de cerveja e uma perda com descarte de purga de cerca de 10% desse volume.

Dessa forma, são gerados cerca de 150 L de efluente retirados na purga. Desse total, são retirados 30 L para serem utilizados na próxima batelada de fermentação. Assim, ao final de cada produção, são descartados aproximadamente 120 L do efluente. A quantidade de efluente correspondente ao ano de 2020 é mostrado na Tabela 5:

Tabela 5 – Produção de cerveja e de efluente em 2020.

Estilo	Produção de cerveja (L)	Efluente descartado (L)
Pilsen	85372,5	6829,776
IPA	5808,0	464,64

Fonte: Autor (2021).

De acordo com a Tabela 5, foi obtida uma produção de efluente de aproximadamente 7300 L no ano de 2020, ou seja, para cada 100 litros de cerveja produzida, foram gerados cerca de 8 litros de resíduo da purga de fermento. Foram considerados os estilos de cerveja Pilsen e IPA por serem responsáveis por quase 93,0% da produção.

5.2 Consumo energético da cervejaria

A cervejaria é composta pelo setor da fábrica, em que as cervejas são produzidas, engarrafadas e armazenadas e por uma loja, onde as mesmas são comercializadas. Alguns dos equipamentos e serviços que demandam energia são um chiller industrial (Figura 4), iluminação e aclimatação da loja (Figura 5) e engarrafadora (Figura 6).

Em todo o processo produtivo, as etapas de fermentação, carbonatação e maturação, também chamada de parte fria, exigem um maior consumo energético pela utilização dos equipamentos de refrigeração.

Figura 4 – Chiller industrial.



Fonte: Autora (2021).

Figura 5 – Equipamentos de refrigeração e iluminação da loja.



Fonte: Autora (2021).

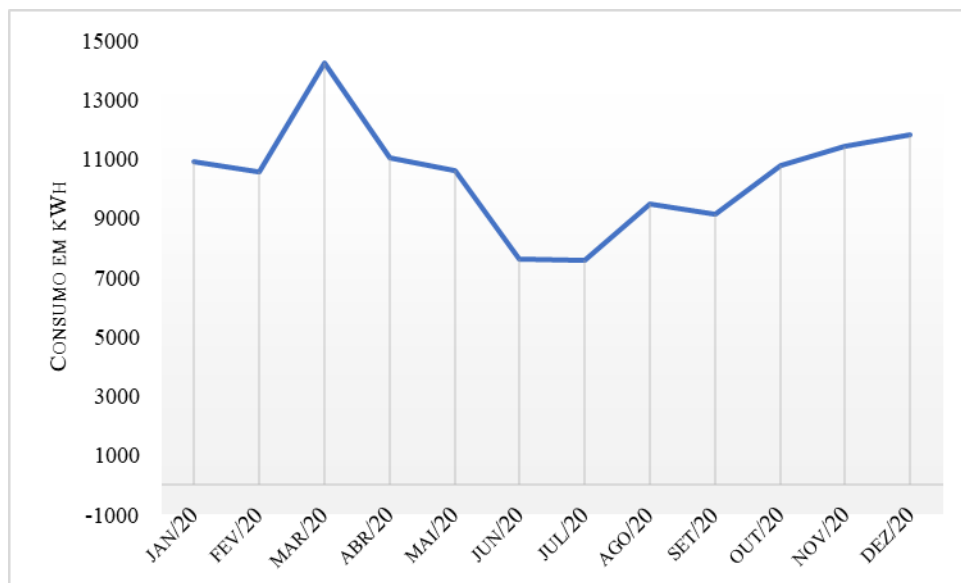
Figura 6 – Engarrafora.



Fonte: Autora (2021).

Os dados do consumo de energia elétrica foram fornecidos pela cervejaria, através da contabilização realizada pela concessionária de energia, para o ano de 2020. O histórico do consumo, representado no Gráfico 1, mostra que anualmente foram consumidos 124931 kWh.

Gráfico 1 – Histórico do consumo de energia no ano de 2020.



Fonte: Autora (2021).

A energia utilizada para o aquecimento do mosto é a energia térmica, oriunda de uma caldeira. O gás natural, combustível da caldeira, é transformado em energia térmica, sendo utilizada na forma de vapor de água em alta pressão, proporcionando o aquecimento do mosto na microcervejaria.

Figura 7 – Caldeira para aquecimento do mosto



Fonte: Autora (2021).

Os dados referentes ao consumo mensal de gás natural do ano de 2020 não foram disponibilizados. Foi obtido apenas o consumo de gás do mês de fevereiro de 2021, correspondente a 840 m³ e, de acordo com a entrevista, o consumo mensal não apresenta grandes variações.

5.3 Potencial de geração de energia a partir do biogás na cadeia de produção de cerveja

Considerando que o reator anaeróbico opera em condições ambientais, a temperatura adotada é de 27,9 °C, que corresponde à temperatura de Maceió, de acordo com o Instituto

Nacional de Meteorologia – INMET. Além disso, para esse tipo de reator, a produção de biogás foi estimada utilizando um rendimento de 63%, um valor que está dentro da faixa normalmente assumida de 60 a 65% (METCALF e EDDY, 2003).

Como o gás natural possui uma composição de cerca de 85% de CH₄ e considerando que o consumo médio mensal da cervejaria é de 800 m³ de gás natural, obtém-se uma vazão de metano de cerca de 680 m³ por mês. A estimativa da vazão de metano consumido mensalmente na caldeira e o volume de metano produzido pelo efluente são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Estimativa da produção e consumo de metano mensal.

	Pilsen	IPA
Efluente da purga (m ³)	6,83	0,46
Volume de CH ₄ (m ³ /mês)	19,20	2,050
Vazão de CH ₄ consumido na caldeira (m ³ /mês)	680	

Fonte: Autora (2021).

Para quantificação da energia elétrica produzida pelo biogás, adotou-se o rendimento do gerador igual a 87%, uma vez que, geradores apropriados para essas máquinas, apresentam rendimentos na faixa entre 85 a 90% (Lima et al., 2012). Essa produção, para cada tipo de tecnologia, é mostrada nas Tabelas 7, 8 e 9.

Os motores a gás apresentam um rendimento (η) inferior e superior de 30 e 34%, respectivamente. Para estimar a potência e a energia elétrica geradas por esse tipo de tecnologia, utilizou-se a Equação 4, a partir do volume de CH₄ disposto na Tabela 6, para cada tipo de cerveja, conforme a tabela 7.

Tabela 7 - Estimativa do potencial e energia elétrica gerados por motores a gás.

	Potencial elétrico do biogás (kW.ano⁻¹)		Energia elétrica do biogás (kWh.ano⁻¹)	
	$\eta = 30\%$	$\eta = 34\%$	$\eta = 30\%$	$\eta = 34\%$
PILSEN	0,04450564	0,050439726	32,48	36,82
IPA	0,004751319	0,005384828	3,46	3,93

Fonte: Autora (2021).

As turbinas apresentam um rendimento (η) inferior e superior de 20 e 24%, respectivamente. Para estimar a potência e a energia elétrica geradas por esse tipo de tecnologia, utilizou-se a Equação 4, a partir do volume de CH_4 disposto na Tabela 6, para cada tipo de cerveja, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Estimativa do potencial e energia elétrica gerados por turbinas a gás.

	Potencial elétrico do biogás (kW.ano ⁻¹)		Energia elétrica do biogás (kWh.ano ⁻¹)	
	$\eta = 20\%$	$\eta = 30\%$	$\eta = 20\%$	$\eta = 30\%$
PILSEN	0,029670427	0,04450564	21,66	32,48
IPA	0,003167546	0,004751319	2,31	3,47

Fonte: Autora (2021).

Já as microturbinas apresentam um rendimento (η) inferior e superior de 24 e 28%, respectivamente. Para estimar a potência e a energia elétrica geradas por esse tipo de tecnologia, utilizou-se a Equação 4, a partir do volume de CH_4 disposto na Tabela 6, para cada tipo de cerveja, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Estimativa do potencial e energia elétrica gerados por microturbinas a gás.

	Potencial elétrico do biogás (kW.ano ⁻¹)		Energia elétrica do biogás (kWh.ano ⁻¹)	
	$\eta = 24\%$	$\eta = 28\%$	$\eta = 24\%$	$\eta = 28\%$
PILSEN	0,035604512	0,041538598	26,0	30,32
IPA	0,003801055	0,004434564	2,77	3,23

Fonte: Autora (2021).

Ao realizar uma comparação com a energia gerada pelo efluente e o consumo de energia elétrica da cervejaria, observa-se que a produção de biogás nos três tipos de motores não consegue suprir a demanda energética da fábrica, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Comparativo da produção de energia com o consumo mensal da cervejaria.

	Energia elétrica do biogás (kWh.mês ⁻¹)		Média do consumo mensal de energia elétrica (kWh)
	(η) inferior	(η) superior	
Motor a gás	2,99	3,39	10410,92
Turbina	1,99	2,99	
Microturbina	2,39	2,79	

Fonte: Autora (2021).

Como a produção de biogás não gera energia que consiga suprir frações mais significativas do consumo mensal da cervejaria, devido ao baixo volume de efluente gerado, por exemplo, as três tecnologias acima não apresentam uma diferença relevante de produção energética.

Além dessa avaliação quantitativa de geração de energia, a escolha da tecnologia exige uma avaliação do modelo que mais se adapta à realidade do local. Assim, é possível minimizar as perdas relacionadas ao mau funcionamento dos equipamentos, devido às divergências, às suas características, como a potência associada à geração de eletricidade, o rendimento com o uso do biogás e sua vida útil (SANTOS, 2019).

5.4 Soluções energéticas para a produção de cerveja

A utilização de gás natural na caldeira para aquecimento do mosto, confere outra alternativa para o uso do efluente da purga: reaproveitamento do biogás gerado no tratamento do efluente como combustível para a caldeira, tecnologia que já é adotada em unidades de tratamento anaeróbio de Estação de Tratamento de Efluentes (CETESB, 2005).

Segundo Zanette (2010), essa é uma tecnologia bem estabelecida e confiável, com poucas restrições em relação à qualidade do biogás. Além disso, para a queima em caldeiras, em geral, não é necessária a sua purificação (METCALF e EDDY, 2016).

O biogás pode ser utilizado nos veículos que utilizam o GNV desde que seja purificado para atingir as especificações do gás natural. Dessa forma, pode ser utilizado como combustível para os veículos da própria fábrica. Através da purificação, será obtido um gás com um poder calorífico maior para aumentar a autonomia do veículo, não resulta em corrosão devido a presença de H_2S , amônia e água e possui uma qualidade declarada e assegurada (ZANETTE, 2009).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Incentivar o crescimento do uso de biogás no Brasil é tão importante para a diversificação da matriz energética do país, quanto para solucionar as questões referentes ao tratamento e gerenciamento de resíduos, sendo possível transformar um passivo ambiental em um ativo energético. O aumento da demanda energética brasileira, abre espaço para o investimento no potencial de produção de biogás do país e resolve outras questões tão importantes como o saneamento básico.

O presente trabalho teve como objetivo quantificar o efluente de uma microcervejaria de Alagoas, avaliando o seu potencial de gerar biogás, bem como a geração de energia térmica e elétrica. O estudo mostrou uma produção de efluente de cerca de 7300 L no ano de 2020, capaz de gerar energia elétrica nas faixas de 35,94 a 40,75 kWh.ano⁻¹ considerando o uso de motor a gás; 23,97 a 35,95 kWh.ano⁻¹ considerando o uso de turbina e, por fim, de 28,77 a 33,55 kWh.ano⁻¹ para a microturbina, em seus respectivos rendimentos.

A produção de energia elétrica produzida a partir do biogás não consegue suprir frações relevantes do consumo energético mensal da cervejaria, que tem como média de 10410,92 kWh. O efluente gerado em um ano, conseguiria suprir cerca de 0,3% do consumo de um mês, por exemplo.

O biogás foi capaz de gerar um volume de metano correspondente a 21,25 m³/mês, podendo ser utilizado na caldeira já existente na fábrica. Essa alternativa, possibilita o uso direto do biogás como combustível para caldeira ou, através de sua purificação, para ser utilizado nos veículos da fábrica como combustível (GNV).

O aproveitamento energético do biogás gerado, através da digestão anaeróbia do efluente da produção de cerveja, tem sido bastante estudado, apresenta resultados promissores e o processo é bem caracterizado em literatura. Dessa forma, a continuidade desse trabalho avaliando a co-digestão, a utilização de pré-tratamentos e de outras condições operacionais, contribuirão para tornar esse sistema viável numa escala de fábrica.

Por fim, é preciso olhar além dos aspectos energéticos estudados, que também são de grande relevância. A produção de biogás através do resíduo gerado na própria produção resolve questões estratégicas para setores industriais desde médio a grande porte: o gerenciamento dos resíduos e a diminuição de custos com o tratamento dos mesmos, que está diretamente atrelada a discussões sociais e ambientais tão importantes, como a escassez de água potável.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a produção de biogás, através da digestão anaeróbia, a partir da co-digestão do efluente da purga de fermento e do bagaço de malte.
- Avaliar a influência de parâmetros operacionais como: temperatura do reator, necessidade de inóculo e carga orgânica.
- Avaliar a necessidade de pré-tratamento do efluente a fim de se obter maior potencial de produção de biogás e biometano.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTO, César Lúcio de Oliveira. **Análise da Qualidade da Energia Elétrica Gerada Através de Biodigestores**. 2015. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Biomassa. Universidade Federal de Alagoas - UFAL. Maceió, 2015.
- ALVES, Ingrid Roberta de França Soares. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- ARANTES, Mabel Karina. **Produção de biohidrogênio em reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais com biomassa imobilizada (ansbbr) a partir de água residuária de cervejaria**. 2018. 132 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2018.
- Arantes, M. K., Alves, H. J., Sequinel, R., & da Silva, E. A. Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 42, p. 26243-26256, 2017.
- BAGGIO, Pamela Leiria. **Estudo Das Tecnologias Existentes Para Geração De Energia Elétrica A Partir Do Biogás**. 2017. 109 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Pato Branco, 2017.
- CERVEJA E MALTE. **Guia básico para produção de cerveja**. Disponível em <<https://http://cervejaemalte.com.br/blog/guia-basico-para-producao-de-cerveja/>>. Acesso em 17 out. 2020.
- CETESB. 2005. **Cervejas e refrigerantes**. Série P+L. São Paulo.
- Chen, H., Chang, S., Guo, Q., Hong, Y., & Wu, P. Brewery Wastewater Treatment Using An Anaerobic Membrane Bioreactor. **Biochemical Engineering Journal**, v. 105, p. 321–331, 2015.
- CHERNICHARO, C. A. L. (1997). **Reatores anaeróbios**. 5ª ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, v.5. p.25.
- DANTAS, Vitória Nascimento. **A trajetória da cultura cervejeira e sua introdução no Brasil**. 2016. 12 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Humanas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.
- FERREIRA, Gabriela da Silva. **Análise da estrutura de mercado da cerveja – a competitividade e estratégias de mercado da indústria cervejeira e micro cervejarias**. 2017. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- GAUDENCIO, Bruno Orlando. **Avaliação do desempenho de dois reatores anaeróbios de leito fixo e fluxo ascendente alimentados com efluente de indústria cervejeira**. 2013. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

LIMA, Ana Carolina Guedes; PASSAMANI, Fernanda Caliman. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES**. 2012. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, 2012.

METCALF, E.; EDDY, H. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4th. ed. New Delhi, India: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2016.

MÜLLER, Carlos Vitor; MARCUSSO, Eduardo Fernandes. **Anuário da cerveja 2019**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/publicacoes/anuario-da-cerveja-2019>. Acesso em: 15 out. 2020.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas**. Rio de Janeiro: Synergia, 2014.

ROSA, Natasha Aguiar; AFONSO, Júlio Carlos. A Química da Cerveja. **Química Nova na Escola**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 98-105, 2015. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/0104-8899.20150030>.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2007.

SANTOS, Mateus Sales dos; RIBEIRO, Flávio de Miranda. **Cervejas e refrigerantes**. São Paulo: CETESB, 2005.

SANTOS, Isabella Maria Tenório Santos. **Utilização de resíduos de avicultura de postura para produção de energia**. 2019. 42 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

Simate, G. S., Cluett, J., Iyuke, S. E., Musapatika, E. T., Ndlovu, S., Walubita, L. F., & Alvarez, A. E. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. **Desalination**, v. 273, p. 235–247, 2011.

SINDICERV. **O setor em números**. Disponível em: <<https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>>. Acesso em 16 out. 2020.

SILVA, Gardênia Azevedo. **Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através do teste BMP**. 2012. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

SOUZA, Juliano de; SOUZA, Samuel N. Melegari de and MACHADO, Paulo Romeu M. **Desempenho de um motor ciclo otto utilizando biogás como combustível**. In Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, 2004.

VERONEZE, Maria Luiza. **Avaliação da produção de biogás a partir de água residuária de cervejaria**. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento energético do biogás no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.