

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WELLINGTON DIAS FIGUEIRA

POTENCIALIZAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS ATRAVÉS DO
CULTIVO DE MICROALGAS E APROVEITAMENTO DA BIOMASSA COMO
COPRODUTO

CURITIBA

2023

WELLINGTON DIAS FIGUEIRA

POTENCIALIZAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS ATRAVÉS DO
CULTIVO DE MICROALGAS E APROVEITAMENTO DA BIOMASSA COMO
COPRODUTO

Artigo apresentado como requisito de conclusão no Curso de MBA em Gestão Estratégica de Energias Naturais Renováveis da Universidade Federal do Paraná, como exigência para obtenção do grau de Pós-graduação.

Orientador. Prof. Dr. Dhyogo Miléo Taher

CURITIBA

2023

POTENCIALIZAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS ATRAVÉS DO CULTIVO DE MICROALGAS E APROVEITAMENTO DA BIOMASSA COMO COPRODUTO

Wellington Dias Figueira

RESUMO

A alta demanda por energia elétrica, as recentes crises hídricas e as necessidades de redução de gases de efeito estufa fizeram com que a importância das energias naturais renováveis aumentasse na matriz elétrica nacional, com destaque para as energias eólica e solar. Nesse contexto, o Biogás apresenta um potencial pouco explorado e as perspectivas são de elevado crescimento de sua produção e utilização nos próximos anos. A utilização do biogás reduz os impactos ambientais através do reaproveitamento de rejeitos orgânicos e da baixa emissão de gases poluentes, principalmente do Metano (CH_4). O objetivo desse trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica a respeito do biogás e tecnologias que utilizam microalgas no processo de purificação (remoção de H_2S , siloxanos e outras impurezas) e de “upgrading” (remoção de CO_2) de modo a potencializar seu poder calorífico. Os autores consultados demonstram que a utilização de microalgas no “upgrade” do biogás tem apresentado resultados promissores podendo atingir 97% (v/v) de concentração de Metano, elevando em cerca de 33% o potencial energético do biogás purificado em comparação ao biogás bruto. Além disso, as microalgas apresentam alta eficiência na captura de impurezas presentes na composição do biogás. As pesquisas demonstram remoção de 40% a 70% de Dióxido de Carbono (CO_2) e de mais de 70% do ácido sulfídrico (H_2S). Além dos benefícios proporcionados no processo de purificação do biogás as microalgas agregam valor ao processo produtivo com subprodutos (óleos e biomassa seca) para diferentes seguimentos industriais, como por exemplo: nutrição humana e animal, cosméticos, biocombustíveis, fertilizantes entre outros.

Palavras-chave: Biogás, Energia Renovável, Metano, Microalgas

ABSTRACT

The high demand for electricity, the recent water crises, and the requirement to reduce greenhouse gases have increased the importance of renewable natural energies in the national electricity matrix, with emphasis on wind and solar energy. In this context, Biogas presents a low explored potential, and the perspectives are of high growth production and use in the coming years. The use of biogas reduces environmental impacts through the reuse of organic waste and the low emission of polluting gases, mainly Methane (CH_4). The objective of this job was to carry out a literature review regarding biogas and technologies that use microalgae in the purification process (removal of H_2S , siloxanes and other impurities) and “upgrading” (removal of CO_2) in order to enhance its calorific power. The consulted authors demonstrate that the use of microalgae in the upgrade of biogas has shown promising results, reaching 97% (v/v) methane concentration, increasing the energy potential of purified biogas by approximately 33% compared to raw biogas. In addition, microalgae are highly efficient in capturing impurities present in the biogas composition. Research shows removal of 40% to 70% of Carbon Dioxide (CO_2) and more than 70% of hydrogen sulphide (H_2S). In addition to the benefits provided in the biogas purification process, microalgae add value to the production process with by-products (oils and dry biomass) for different

industrial segments, such as: human and animal nutrition, cosmetics, biofuels, fertilizers, among others.

Keywords: Biogas, Renewable Energy, Methane, Microalgae.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Etapas da biodigestão anaeróbia.....	11
FIGURA 2: Esquema Ilustrativo Biodigestor.....	13
FIGURA 3: Fotobioreatores Tubulares	18
FIGURA 4: Mercado para produtos derivados de algas	20
FIGURA 5: Poder calorífico do biogás relacionado a variação percentual de metano	24

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Composição Típica do Biogás	7
TABELA 2: Propriedades típicas do biogás e gás natural	7
TABELA 3: Comparativo poder calorífico do biogás com outros gases	8
TABELA 4 - Principais Autores consultados no desenvolvimento do artigo	9
TABELA 5: Principais Regulamentações e Normas Brasileiras sobre Biogás	10
TABELA 6: Divisão da digestão anaeróbia por faixa de temperatura.....	11
TABELA 7: pH recomendado para equilíbrio no reator	12
TABELA 8: Impurezas e Impactos do Biogás.....	14
TABELA 9: Técnicas utilizadas para remoção de impurezas do biogás	15
TABELA 10: Especificações do Biometano.....	16
TABELA 11: Comparação entre sistemas abertos e fechados para cultivos de microalgas.....	17
TABELA 12: Rendimento anual de diferentes matérias-primas para produção de biodiesel.....	21
TABELA 13: Descrição das Características dos Métodos de Purificação de Biogás	22
TABELA 14: Estudos de Microalgas para biofixação de CO ₂	23
TABELA 15: Poder calorífico em função da composição do biogás.....	25
TABELA 16: %redução de impurezas do Biogás purificado por microalgas	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2 OBJETIVO GERAL	8
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3 METODOLOGIA	9
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
4.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA	10
4.2 BIODIGESTORES	12
4.3 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	13
4.4 MICROALGAS	16
4.4.1 Vantagens	18
4.4.2 Desvantagens	19
4.4.3 Potencial de aplicação em Economia Circular	19
4.5 PURIFICAÇÃO BIOLÓGICA	22
4.6 DESSULFURIZAÇÃO DE BIOGÁS	23
4.7 PODER CALORÍFICO	24
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

1.1 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Biogás é um dos produtos resultantes da decomposição de material orgânico na ausência de oxigênio. Sua composição química depende diretamente do tipo de resíduo orgânico e do processo de produção. A TABELA 1 mostra a composição típica do biogás.

TABELA 1: Composição Típica do Biogás

Componente	Teor em volume
Metano (CH ₄),	50 a 75%
Dióxido de carbono (CO ₂)	25 a 40%
Hidrogênio (H ₂)	1 a 3%
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 2,5%
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 0,5%
Ácido Sulfídrico (H ₂ S)	0,1 a 0,5%
Amônia (N ₃)	0,1 a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0,1%
Água (H ₂ O)	Variável

FONTE: PACCO (2006)

O Metano (CH₄), apesar de ser altamente poluente e ser um dos principais causadores do efeito estufa, possui relevante importância devido a sua característica inflamável. Na TABELA 2, Okamura (2013) apresenta as propriedades típicas do biogás, o comparando ao gás natural.

TABELA 2: Propriedades típicas do biogás e gás natural

Características	Unidade	Biogás Biodigestor	Biogás Aterro	Gás Natural
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	20	12,3	48
Densidade	Kg/Nm ³	1,1	1,3	0,82
Densidade relativa	-	0,9	1,1	0,63
Índice de Wobbe	MJ/Nm ³	27	18	55
Número de metano*	-	>135	>130	73
CH ₄ (faixa variável)	Vol.-%	60 -70	35 – 65	85 – 92
Hidrocarbonetos pesados	Vol.-%	0	0	9
Hidrogênio (H ₂)	Vol.-%	0	0 – 3	-
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Vol.-%	35	40	0,7
CO ₂ faixa variável	Vol.-%	30 – 40	15 – 40	0,2 – 1,5
Nitrogênio (N ₂)	Vol.-%	0,2	15	0,3
N ₂ (faixa variável)	Vol.-%	-	5 – 40	0,3 – 1,0
O ₂ (faixa variável)	Vol.-%	-	0 – 5	-
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	ppm	< 500	< 100	3,1
H ₂ S (faixa variável)	ppm	0 – 4000	0 – 100	1,1 – 5,9
Amônia	ppm	100	5	-
Cloro Total	Mg/Nm ³	0 - 5	20 - 200	-

FONTE: OKAMURA (2013)

O biogás possui poder calorífico muito abaixo comparado a outros gases combustíveis, conforme demonstrado na TABELA 3. Um dos grandes desafios envolvidos na produção e utilização do biogás é aumentar seu potencial energético, eliminando componentes que tornam o processo de queima menos eficiente. Substâncias como água e dióxido de carbono absorvem parte da energia gerada e o ácido sulfídrico contribui para uma combustão incompleta. Além disso, esses compostos químicos podem ocasionar problemas relacionados à corrosão, incrustações e outros danos aos equipamentos e componentes do sistema.

TABELA 3: Comparativo poder calorífico do biogás com outros gases

Gás	Poder Calorífico (kcal/Nm³)
Biogás	5.500
Butano	28.000
Gás de Cozinha (GLP)	25.775
Gás Natural	7.600
Metano	8.500
Propano	22.00

FONTE: LIMA (2012)

Os sistemas de purificação de biogás representam parte considerável do investimento em uma planta de geração de biogás/biometano, e neste sentido quanto melhor for o rendimento do processo (eficiência para remover H₂S, siloxanos e outras impurezas) maior terá sido o custo de investimento nesta parte produtiva. Diversos estudos (pilotos) apresentam resultados promissores utilizando processo de purificação biológica por microalgas como alternativa aos processos tradicionais, estes microrganismos proporcionam alto rendimento de purificação e alternativas de subprodutos para serem utilizados em Economia Circular, com possibilidades de amortização dos investimentos iniciais.

2 OBJETIVO GERAL

O Objetivo deste trabalho é demonstrar métodos de purificação biológica do biogás, e apresentar o cultivo de microalgas como produto secundário da produção de biogás e sua importância em economia circular. A fim de se atingir o objetivo geral, estabeleceu-se os seguintes objetivos específicos:

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i. Descrição da produção de biogás
- ii. Descrição dos métodos de purificação do biogás,
- iii. Apresentação do cultivo de microalgas como processo de purificação biológica
- iv. Análise do poder calorífico do biogás
- v. Apresentação das vantagens e desvantagens da utilização de microalgas
- vi. Avaliação da biomassa de microalgas como coprodutos diversos do processo de potencialização do poder calorífico do biogás

3 METODOLOGIA

Para realização deste trabalho foi utilizada a metodologia de revisão bibliográfica, que consistiu em um processo de pesquisa em portais científicos de obras relevantes ao tema e objetivo propostos. Foram considerados títulos nacionais e internacionais relacionados aos temas: biogás, biometano, poder calorífico, purificação biológica e microalgas. A análise inicial dos materiais permitiu classificá-los de maneira a auxiliar na divisão e construção dos objetivos específicos. A TABELA 4 apresenta os principais Autores utilizados como referência neste artigo.

TABELA 4 - Principais Autores consultados no desenvolvimento do artigo

Autor	Ano	Publicação
Cremones	2013	Biodigestão Anaeróbica no Tratamento de Resíduos Lignocelulósicos
Okamura	2013	Avaliação e Melhoria do Poder Calorífico de Biogás Proveniente de Resíduos Sólidos Urbanos;
Miyawaki	2014	Purificação de Biogás Através de Cultivo de Microalgas em Resíduos Agroindustriais
Müller	2014	Dessulfurização Biológica de Biogás nas Condições Ambientais do Brasil
Matsuoka	2015	Purificação de Biogás de Aterro Sanitário por Tratamento Químico e Metabolismo de Microalgas
Brasil	2016	Microalgas: Alternativas promissoras para a Indústria
Araujo	2017	Produção de Biogás a Partir de Resíduos Orgânicos Utilizando Biodigestor Anaeróbico
Miyawaki	2020	Microalga derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment

FONTE: O AUTOR (2023)

A regulamentação brasileira também foi utilizada como fonte de consulta. A ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) normaliza, desde 2015, como deve ser a mistura de gases combustível para ser denominada “biometano”, determinando o nível mínimo de metano e níveis máximos de gás carbônico e contaminantes. A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) possui normas relacionadas ao gás natural que são estendidas para o biometano. A TABELA 5 apresenta as principais normas e regulamentações sobre o tema:

TABELA 5: Principais Regulamentações e Normas Brasileiras sobre Biogás

Órgão	Resolução / Norma	Descrição
ANP	08/2015	Qualidade e características físico-químicas do biometano produzido a partir de resíduos orgânicos agrosilvopastoris (resíduos agrícolas, resíduos florestais ou resíduos de criação de animais)
ANP	685/2017	Qualidade e características físico-químicas do biometano produzido a partir de aterros sanitários e tratamento de esgoto (resíduos agrícolas, resíduos florestais ou resíduos de criação de animais)
ANP	734/2018	Regula a autorização para a produção e comercialização de biocombustíveis (dentre eles o biometano)
ABNT	NBR 14903	Normas para determinação da composição do gás natural (aplicável para biogás e biometano)
ABNT	NBR 15616/15614	Normas para odoração de gases (quando necessário odoração do biogás e biometano)
ABNT	NBR 15631	Normas para determinação de compostos sulfurados no gás natural (aplicável ao biogás e biometano)
ABNT	NBR 15765	Normas para determinação de teor de vapor d'água no gás natural (aplicável ao biogás e biometano)
ABNT	NBR 16560/16561	Norma para determinação de siloxanos no biogás e biometano
ABNT	NBR 16562	Normas para determinação de compostos orgânicos voláteis no biogás e biometano
ABNT	NBR 16837	Normas para injeção de biometano em redes de distribuição de gás canalizado (em elaboração)

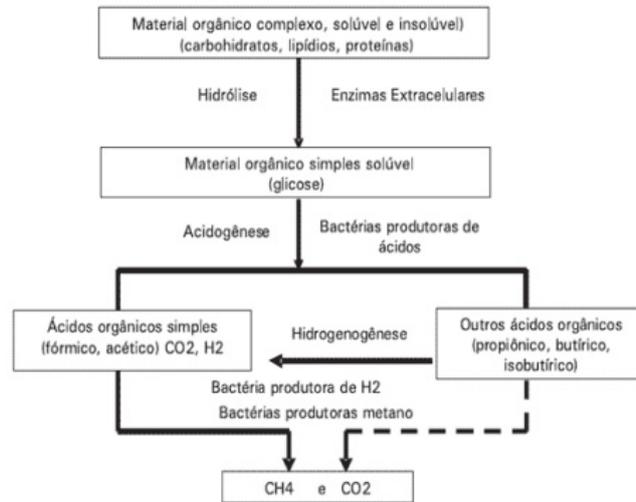
FONTES: O AUTOR (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia (biodigestão) é o processo natural de decomposição da matéria orgânica através da ação de micro-organismos em ambientes sem a presença de oxigênio, conforme exemplificado na FIGURA 1 e descrito por Cremonez (2013). O processo de biodigestão desenvolve-se ao longo de etapas distintas:

FIGURA 1: Etapas da biodigestão anaeróbia



FONTE: CREMONEZ (2013)

- Hidrólise: é a fase de transformação da matéria sólida, ocorrendo a quebra das cadeias carbônicas de proteínas, lipídios, e carboidratos para compostos mais simples como aminoácidos, açúcares, glicerol e ácidos graxos
- Acidogênese: nesta fase os produtos gerados no processo de hidrólise são convertidos em ácido acético, dióxido de carbono, ácidos graxos, dentre outros compostos e são absorvidos pelas células das bactérias fermentativas.
- Acetanogênese: fase na qual ocorre a transformação de ácidos graxos em ácido acético, liberando hidrogênio e CO₂.
- Metanogênese: na última etapa ocorre a produção de metano (CH₄) por dois grupos de bactérias, um deles que produz metano pela conversão do ácido acético (bactérias acetotróficas) e outro que o produz a partir da conversão de hidrogênio e dióxido de carbono (bactérias hidrogenotróficas).

Segundo o estudo de Honório (2009), o processo biodigestório é afetado principalmente pelos seguintes fatores:

- Temperatura: afeta a velocidade do metabolismo das bactérias, o equilíbrio iônico e a solubilidade dos substratos. A TABELA 6 apresenta como se divide a digestão anaeróbia por faixa de temperatura

TABELA 6: Divisão da digestão anaeróbia por faixa de temperatura

Divisão da digestão anaeróbia	Temperatura	Aplicação
psicrofílica	$T < 20^{\circ}\text{C}$	baixa eficiência
mesofílica	$20 < T < 42^{\circ}\text{C}$	bom desempenho
termofílica	$50 < T < 65^{\circ}\text{C}$	ideal para altos teores de material particulado

FONTE: HONORIO (2009)

- pH: microorganismos diferentes atuam nas diferentes fases da digestão anaeróbia, suas necessidades em termos de pH também diferem, a TABELA 7 demonstra as faixas de pH nas fases de acidogênese e metanogênese e apresenta a recomendação de equilíbrio para o reator

TABELA 7: pH recomendado para equilíbrio no reator

	acidogênese	metanogênese	recomendado para o Reator
pH	5,8 ~ 6,0	6,8 ~ 7,2	6,6 ~ 7,6

FONTE: HONORIO (2009)

- Alcalinidade: Recomenda – se que a alcalinidade ideal esteja na faixa de 1000 a 5000 mg CaCO_3/l e que a concentração de AGV não ultrapasse 250 mg/l.
- Nutrientes: Os macronutrientes (N, P, K, S, Ca e Mg) são necessários para manter a relação ideal da demanda química de oxigênio, e os micronutrientes (Fe, Ni, Co, Mo, Zn, Mn e Cu) podem ser adicionados para aumentar a eficiência da degradação.
- Toxicidade: Os principais agentes tóxicos para os microorganismos anaeróbios são: Na, K, Ca e Mg, sulfetos, amônia e metais pesados. Os efeitos podem variar dependendo da concentração destas substâncias.

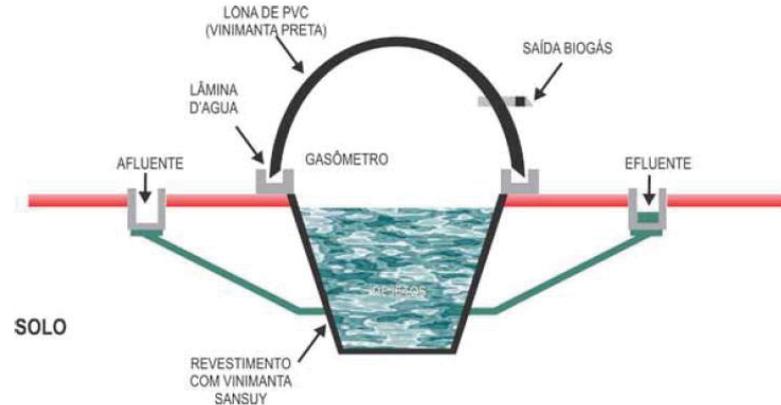
4.2 BIODIGESTORES

Os biodigestores são definidos por Araujo (2017) como equipamentos herméticos e impermeáveis utilizados para fermentação anaeróbia de material orgânico, ou seja, sem a presença de ar atmosférico, por um determinado tempo de retenção, no qual ocorre um processo bioquímico denominado biodigestão anaeróbia, obtendo como principais produtos o metano, o dióxido de carbono, e biofertilizantes.

Existem diferentes formas construtivas de biodigestores, de maneira geral, todos são compostos por um recipiente (tanque) onde a biomassa é armazenada e

ocorre a biodigestão, e o gasômetro (campânula) que armazena o biogás. A FIGURA 2 demonstra estes componentes:

FIGURA 2: Esquema Ilustrativo Biodigestor



FONTE: MONTORO (2013)

O sistema de abastecimento de biomassa classifica os biodigestores em:

- Batelada: abastecimento único, o descarregamento do material é realizado após o ciclo completo de biodigestão. Usualmente empregados quando a produção de biomassa é sazonal.
- Contínuo: recebem o material orgânico periodicamente, permite a retirada cíclica do substrato processado.

4.3 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás em condições normais de produção apresenta baixo teor de monóxido de carbono, mas com elevado teor de impurezas, com destaque para os compostos de enxofre (H_2S - sulfeto de hidrogênio) e amoníaco, o que tornam o biogás corrosivo para diversas ligas metálicas como cobre, latão e aço, e pode torná-lo tóxico dependendo das condições de reação com estes materiais. Segundo Oliveira (2018) as impurezas presentes no biogás prejudicam o processo de queima pois absorvem parte da energia gerada, tornando o combustível menos eficiente. Os principais impactos causados pelas impurezas do biogás foram relacionados por Santos (2016) na TABELA 8.

TABELA 8: Impurezas e Impactos do Biogás

Impureza	Impacto
Água	Corrosão em compressores, tanques de armazenamento e motores devido à reação com H ₂ S e CO ₂ formando ácidos; Acumulação de água nas tubagens; Condensação e/ou congelamento a pressões elevadas.
Poeiras	Atascamento devido ao depósito em motores e tanques de armazenamento
H ₂ S	Corrosão em compressores, tanques de armazenamento e motores; Concentração tóxica de H ₂ S (>5cm ³ /m ³) permanece no biogás; SO ₂ e SO ₃ são formados quando da combustão, os quais são mais tóxicos que o H ₂ S e em conjunto com a água provocam corrosão.
CO ₂	Afeta o poder calorífico inferior.
Siloxanos	Formação de SiO ₂ e micro cristais de quartzo durante a combustão; Depósito em velas de ignição, válvulas e cabeças de cilindros provocando abrasão nas superfícies
NH ₃	Corrosivo quando dissolvido em água
Cl ⁻³	Corrosão em motores de combustão
F ⁻	Corrosão em motores de combustão

FONTE: SANTOS (2016)

Conforme Lima (2016), para o tratamento do biogás, os métodos de absorção física e química são geralmente utilizados por serem efetivos mesmo para baixas vazões encontradas normalmente nas plantas de biogás. Considera-se também que estes métodos são mais simples e requerem menor investimento em infra-estrutura. A seguir pode-se observar a definição dos processos, de acordo com Lima (2016):

- Absorção: Na absorção química tem-se a ocorrência de uma reação química entre o gás absorvido e o líquido solvente, podendo ou não ocorrer a regeneração do líquido solvente. Na absorção física, o gás é simplesmente dissolvido no líquido solvente sem que ocorra reação química. É uma das técnicas mais utilizadas para para purificação do biogás, sendo que usualmente se utiliza água como solvente. Nesse processo o biogás bruto é injetado no fundo de uma coluna e o solvente entra em contracorrente, eliminando as impurezas que são coletadas no fundo. O biogás purificado é extraído no topo da coluna. Neste ponto, o biogás está saturado com água, sendo necessário submetê-lo a um processo de secagem.
- Adsorção: a técnica consiste em fixar as moléculas das impurezas (H₂S, CO₂, H₂O) sobre uma superfície porosa, sendo que, a seletividade da adsorção será definida por diferentes tamanhos de poros.

- Separação por Membrana: O método explora a diferença de permeabilidade dos gases através de membranas, sendo possível eliminar simultaneamente o gás carbônico, o ácido sulfídrico e a água.
- Separação criogênica: através do resfriamento do biogás utilizando-se pressão elevada, obtém-se impurezas como H₂O e CO₂ em estado líquido.
- Depuração: esta técnica consiste em circular o biogás através de uma massa depuradora (óxido de ferro), o gás sulfídrico irá reagir com o óxido de ferro ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$)

Na TABELA 9 temos a correlação da tecnologia mais utilizada para eliminar cada tipo de impureza segundo Oliveira (2018)

TABELA 9: Técnicas utilizadas para remoção de impurezas do biogás

Impureza	Tecnologia	Material Utilizado
Água	Adsorção	Sílica Gel
		Peneira Molecular
		Alumina
	Absorção	Etilenoglicol
		Temperatura -6,7°C
		Selexol
Refrigeração	Resfriamento a 2°C	
Hidrocarbonetos	Adsorção	Carvão Ativado
	Absorção	Óleo Leve
		Etilenoglicol
		Selexol
	Combinação	Temperatura entre -6,4°C e -33,9°C Refrigeração com Etilenoglicol e adsorção em carvão ativado
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Solventes orgânicos
		Selexol
		Flúor
		Rectisol
		Soluções de sais alcalinos
		Alcanolaminas
		Mono, di e trietanolaminas
		Diglicolamina
	Ucarsol – CR. (Solvente)	
	Adsorção	Peneiras Moleculares
Carvão Ativado		
Separação por Membranas	Membrana de fibra oca	
Siloxina	Adsorção	Carvão Ativado

FONTE: OLIVEIRA (2018)

Silva (2017), descreve o biometano, como sendo um combustível gasoso com elevado teor de metano e características equivalentes ao gás natural, podendo ser integrado a rede de distribuição de gás natural, desde que, suas características e as concentrações de componentes corrosivos atendam as especificações da resolução ANP n° 8 de fevereiro de 2015, conforme apresentado na TABELA 10

TABELA 10: Especificações do Biometano

Características	Unidade	Limite	Método		
			NBR	ASTM	ISO
Metano	% mol	96,5	14903	D1945	6974
Oxigenio, máx.	% mol	0,5	14903	D1945	6974
CO ₂ , máx.	% mol	3,0	14903	D1945	6974
CO ₂ + O ₂ + N ₂ , máx		3,5	14903	D1945	6974
Enxofre total	mg/m ³	70	15631	D5504	6326-3; 6326-5 e 19739
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	mg/m ³	10	15631	D5504 e D6228	6326-3 e 19739
Ponto de orvalho de água a 1 atm	°C	-45	15765	D5454	6327; 10101-2; 10101-3 e 11541

FONTE: ANP (2015)

As próximas seções descreverão as microalgas e sua importância como técnica de técnica de purificação e “*upgrade*” do biogás para biometano, que permite a remoção H₂S, siloxanos, e outras impurezas e absorção CO₂ no mesmo ciclo de processo.

4.4 MICROALGAS

Segundo Miyawaki (2020) as microalgas são as formas mais antigas de vida no planeta. São organismos presentes em diferentes ambientes aquáticos/úmidos, sua estrutura unicelular lhes permite facilmente converter a energia solar em energia química (pela fotossíntese), sendo consideradas responsáveis por pelo menos 60% da produção de oxigênio presente na biosfera. O crescimento das microalgas se dá a um ritmo acelerado chegando a ser 100 vezes mais rápido do que as plantas terrestres podendo dobrar sua biomassa em menos de um dia. Em sua pesquisa, ainda, descreve as espécies de microalgas mais conhecidas e que comumente são utilizadas para tratamento de efluentes e biorremediação:

- *Scenedesmus sp.*: Cultivada em água doce, desenvolve-se em diferentes níveis de temperatura e pH; utilizada para fixação de CO₂, tratamento de efluentes e síntese de lipídeos para produção de biocombustíveis.
- *Spirulina sp.*: Desenvolve-se em água com níveis alcalinos de pH; é utilizada pela indústria de suplementação alimentar humana e animal por ser rica em proteínas, vitaminas, aminoácidos essenciais, minerais, ácidos graxos poliinsaturados e outros nutrientes

- *Chlorella sp.*: Pode ser cultivada tanto em água doce quanto em ambiente salino; as aplicações desta espécie estão relacionadas a alimentação humana para aplicações em viagens espaciais e a geração de bioenergia
- *Dunaliella salina*: Cultivada em ambiente salino com a limitação de nutrientes, baixas temperatura, aumento da intensidade de luz; utilizada pela indústria farmacêutica como suplemento de saúde
- *Haematococcus pluvialis*: é uma microalga verde unicelular biflagelada que sob condições de estresse acumulam astaxantina e lipídeos em grandes concentrações.

Normalmente o cultivo é realizado em sistemas abertos, sob condições naturais de iluminação e temperatura, praticamente sem condições de controle destes parâmetros ambientais. Apesar de serem viáveis financeiramente, o volume pode variar significativamente de poucos litros até bilhões de litros, além de ter maior risco de contaminação e perda do produto. O desenvolvimento de fotobiorreatores (sistemas fechados de cultivo) permite controlar os parâmetros ambientais como a iluminação, temperatura, pH, CO₂, o que resulta em elevadas produtividades. e menor risco de contaminação por bactérias ou microalgas de outras espécies.

Matsuoka (2015) explica que os sistemas abertos são predominantemente utilizados na produção de microalgas destinados a produtos de baixo valor, como por exemplo biocombustíveis, e os sistemas fechados por proporcionarem melhor controle de processo são utilizados na produção de substâncias de alto valor comercial, produtos terapêuticos por exemplo. A TABELA 11 apresenta as principais informações comparativas entre os sistemas de cultivos de microalgas abertos e fechados:

TABELA 11: Comparação entre sistemas abertos e fechados para cultivos de microalgas

	Sistemas Abertos	Sistemas Fechados
Risco de contaminação	Alto	Baixo
Perdas CO ₂	Alto	Baixo
Perdas evaporativas	Alto	Baixo
Eficiência do uso de radiação	Pobre	Excelente
Razão área/volume	Baixo	Alto
Área requeridas	Alta	Baixa
Controle do processo	Difícil	Fácil
Produtividade biomassa	Baixa	Alta
Custo investimento	Baixo	Alto
Custos de operação	Baixo	Alto
Custos de manutenção	Alto	Relativamente Baixo
Scale up (Escalonamento)	Fácil	Difícil

FONTE: MATSUOKA (2015)

O Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS) implantando em 2008 na UFRP, tem como principal objetivo obter um prédio autossustentável utilizando o biodiesel de microalgas no processo de geração de energia elétrica. A produção de biodiesel em larga escala é uma das principais missões do NPDEAS, sendo que os principais trabalhos de pesquisa estão relacionados ao desenvolvimento de fotobioreatores que possibilitem o cultivo de microalgas de forma controlada e eficiente. A FIGURA 3 ilustra um sistema fechado para produção de microalgas

FIGURA 3: Fotobioreatores Tubulares



Características principais:

- 3,5 km de tubos transparentes
- Volume operacional 12m³;
- Área 10m²;
- Altura 8m;
- Largura 2m;
- Comprimento 5m;

FONTE: fotos O AUTOR (2021); dados: MIYAWAKI (2014)

4.4.1 Vantagens

Conforme estudo publicado pela Embrapa Agroenergia, “Microalgas” (2016, pág.9) as principais vantagens na utilização de microalgas são:

- alta produtividade - geralmente de 10 a 100 vezes maior do que as culturas agrícolas tradicionais;
- captura de carbono altamente eficiente;
- elevado teor de lipídeos ou amido, que podem ser utilizados para produção de biodiesel ou etanol, respectivamente;
- cultivo em água do mar, água salobra ou mesmo em águas residuais e produção sobre terras não agricultáveis.
- podem ser colhidas continuamente ao longo do ano em regiões tropicais, sem período de entressafra.

- o cultivo e o processamento de microalgas podem ser realizados em um mesmo local, uma característica que favorece a produção integrada e sequencial de vários produtos e reduz os custos de logística nas instalações de biorrefinarias.

Segundo BRASIL (2016) a viabilidade técnica para se produzir bioplásticos, polímeros e biocombustíveis, como biodiesel, etanol e bioquerosene, por meio de microalgas, já foi demonstrada. Os desafios tecnológicos atuais consistem principalmente no melhoramento genético de cepas, no desenvolvimento de métodos eficientes de cultivo, no controle de pragas e na otimização dos processos de colheita.

4.4.2 Desvantagens

Segundo Cardoso (2016) o principal desafio na produção de microalgas está no escalonamento de produção. Produções em nível laboratorial sob condições ideais para determinada espécie, controlando-se as condições de cultura (temperatura, concentração de nutrientes, luminosidade e outros fatores) são muito promissoras, mas a medida que se aumenta a escala de cultivo torna-se mais difícil manter os parâmetros de controle necessitando de mais investimento no controle dos meios de cultura. Desta forma, a produção em larga escala envolvendo milhares de litros de meio de cultura pode se tornar impeditivo.

Outra desvantagem apontada pelo estudo está na metodologia, pois, cada microalga apresenta particularidades em sua membrana ou parede celular, fazendo com que normalmente uma metodologia para processamento de uma microalga não sirva para o processamento de uma microalga de outro grupo taxonômico ou mesmo de outra espécie do mesmo grupo, dificultando desta forma a produção de diferentes espécies em um mesmo processo.

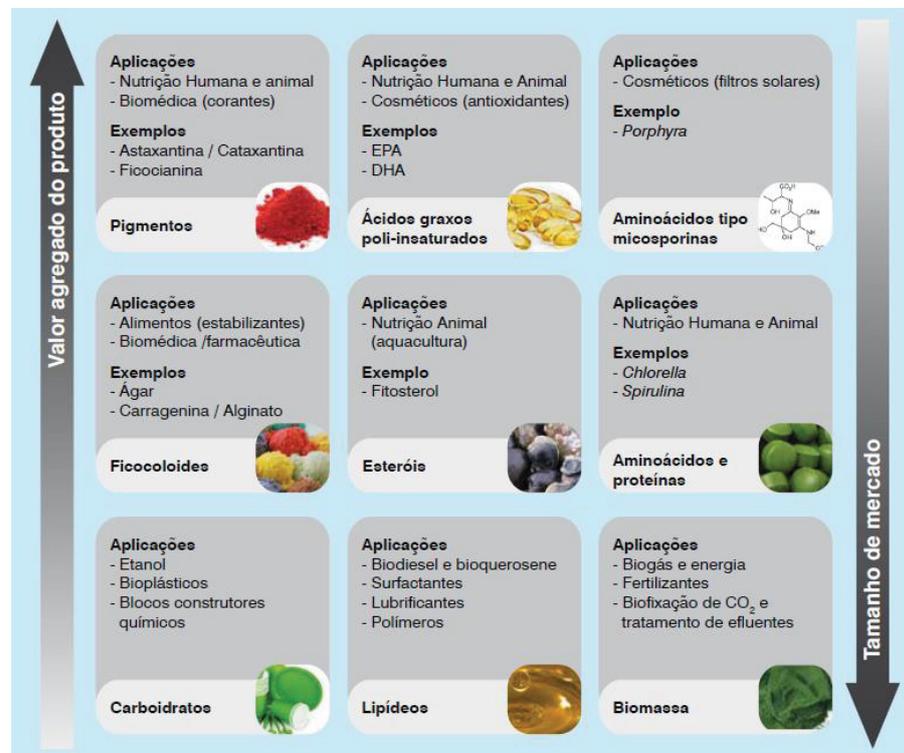
4.4.3 Potencial de aplicação em Economia Circular

Conforme descrito por Brasil (2016) a indústria de base biológica deve desempenhar papel de destaque no século 21 devido a necessidade de substituir a dependência das fontes energéticas fósseis, investimentos em tecnologias inovadoras e voltadas a sustentabilidade ambiental se fazem necessário visto as mudanças climáticas globais. As projeções de crescimento populacional mundial irão demandar

aumento por energia e alimentos nas próximas décadas também irão impulsionar este mercado.

Os produtos derivados de algas possuem alto valor agregado e abastecem principalmente o mercado de cosméticos, higiene pessoal e nutrição (humana e esportiva), a FIGURA 4 relaciona o valor agregado do produto ao potencial de mercado dele. São produzidos (em pequena e média escala) principalmente por China, Japão e Estados Unidos, em sua pesquisa Brasil (2016) demonstrou que durante o período de 2004 a 2013 a produção mundial de biomassa de microalgas secas atingiu a marca de 15 mil toneladas/ano, os gêneros mais cultivados foram *Arthrospira (Spirulina)* e *Chlorella* sendo utilizadas como fontes de pigmentos para a indústria de cosméticos ou como suplementos proteicos para a alimentação humana e aquicultura, as espécies *Dunaliella salina* e *Haematococcus pluvialis* tiveram muita utilização na indústria de pigmentos e antioxidantes, como os carotenoides astaxantina, cantaxantina e betacaroteno. Os produtos provenientes de biomassa de microalgas podem atingir cerca de 8.000 US\$/kg, e estima-se que movimentam mais de US\$ 10 bilhões por ano.

FIGURA 4: Mercado para produtos derivados de algas



FONTE: SANTOS (2016)

Na perspectiva de Chies (2016) a indústria brasileira já está explorando o potencial das microalgas. Como exemplo, duas linhas de cosméticos da Ind. Natura utilizam em sua composição óleos de microalgas e informa ainda que a empresa tem estudos para ampliar a utilização desse insumo, principalmente, com foco em cremes e loções. A possibilidade de trabalhar com uma nova plataforma tecnológica que permitisse aumento de produtividade aliada a redução de impacto ambiental foram os fatores motivadores para a empresa investigar a performance dos óleos de microalgas. Outro exemplo citado por Chies (2016) adiante é a Ind. Intercement (ocupa a segunda posição no mercado nacional de produção de cimento) que está apostando no potencial de absorção de CO₂ das microalgas como alternativa de redução de emissões atmosféricas. O projeto em desenvolvimento consiste em injetar o gás de combustão dos fornos em tanques com microalgas de forma a absorverem o Carbono.

O mercado de biocombustíveis também é bastante promissor. Myawaki (2020) afirma que a utilização de óleo de microalgas como matéria-prima para a produção de biodiesel apresenta grande potencial, visto que a produtividade lipídica das microalgas em relação à massa seca da biomassa pode ser de 15 a 300 vezes maior do que de plantas terrestres. Outras vantagens apontadas é que as microalgas apresentam crescimento rápido, são ricas em óleo e não competem com a produção de alimentos agrícolas, fato recorrente com culturas tradicionais (soja, girassol e óleo de palma) na produção de biodiesel. Os dados da TABELA 12 demonstram a importância das microalgas como alternativa produtiva com potencial para competir com o diesel fóssil.

TABELA 12: Rendimento anual de diferentes matérias-primas para produção de biodiesel

Fonte	% de óleo na biomassa seca	Rendimento de óleo (l/ha ano)	Área utilizada (m ² /kg biodiesel ano)	Produtividade de biodiesel (kg biodiesel/ha ano)
Milho	44	172	66	152
Cânhamo	33	363	31	321
Canola	41	974	12	862
Girassol	40	1.070	11	946
Palma	36	5.366	2,0	4.747
Microalga	30 ~ 79	58.700 ~ 136.900	0,1 ~ 0,2	52.000 ~ 121.000

MIYAWAKI (2014)

4.5 PURIFICAÇÃO BIOLÓGICA

Conforme descrito por Matsouka (2015) a purificação biológica é uma tecnologia promissora que consiste na retenção de CO₂ e captura de impurezas, ao passar o biogás por uma massa de organismos fotossintéticos (microalgas). Durante o processo de filtragem do biogás, as microalgas alimentam seu crescimento celular com o CO₂ retido do biogás pelo processo de fotossíntese, no mesmo processo o oxigênio gerado serve como acceptor de elétrons, o qual é utilizado por bactérias oxidantes de H₂S, garantindo alta eficiência de remoção do CO₂ e H₂S do biogás.

Os estudos realizados por Miyawaki (2020) demonstram a alta capacidade de purificação do biogás pelas culturas de microalgas em fotobioreatores. Na TABELA 13, Miyawaki (2014) descreve as principais vantagens e desvantagens dos métodos de purificação de biogás e apresenta a estimativa de % final de metano para cada processo.

TABELA 13: Descrição das Características dos Métodos de Purificação de Biogás

Método	Vantagens	Desvantagens	% (v/v) final de metano
Purificação por membrana	Segurança e simplicidade de operação Não geração de produtos químicos perigosos	Resíduos de saída ainda contém concentrações de CH ₄ que é altamente poluente	90 – 96
Lavagem de gás	Operam com baixa vazões de biogás Exige menos infraestrutura Simples e mais econômico	O efluente líquido necessita de pós-tratamento; Descarte de emissões poluentes na atmosfera	95 – 100
Purificação criogênica	Economicamente viável quando o processo envolve grandes quantidades de biogás	Exigência de vários equipamentos e dispositivos, como: turbinas, compressores e colunas de destilação	97
Purificação por adsorção	Simples e de fácil operação; Boa capacidade de retenção de umidade;	Necessidade de alta temperatura e pressão que torna o processo mais caro;	97
Purificação Biológica	Produção de biomassa no processo de fixação de CO ₂ por meio da fotossíntese agregando valor ao processo;	Métodos recentes que ainda necessitam de estudos;	87 - 97

FONTE: MIYAWAKI (2014)

Miyawaki (2014) informa existir poucos trabalhos relacionados à utilização de microalgas para purificação de biogás em grandes escalas. Apresentou em seu estudo a patente internacional CN 102392052 (A) – 2012 que utiliza cultura autotrófica de microalgas para purificar biogás em um fotobioretator cilíndrico. O equipamento possui uma vazão de fluxo de biogás com variação de 100 a 500mL.min⁻¹, atingindo

taxa de concentração de metano de 80 a 85% (v/v) no gás de saída. Apresentou também a patente brasileira PI 0703245-5 A2 (2009), que descreve um processo de purificação de biogás utilizando microalgas e demonstra alcançar níveis de 100% de metano, entretanto, o documento não apresenta detalhes do processo.

A TABELA 14 apresenta o levantamento realizado por Henrard (2013) de estudos relacionados à biofixação de CO₂ utilizando algumas espécies de microalgas, as quais podem ser utilizadas também para a purificação de biogás.

TABELA 14: Estudos de Microalgas para biofixação de CO₂

Microalgas	CO ₂ injetado (% v/v)	CO ₂ fixado (g.L ⁻¹ .d ⁻¹)	Fotobiorreator	Referências
Anabaena sp.	10	1,01	Bolhas	Chiang et al. (2011)
Chlorell sp.	5	0,7	Tubular vertical	Ryu et al. (2009)
Chlorella vulgaris	5	0,16	Colunas em série	Lam e Lee (2013)
Chlorella vulgaris	10	0,25	Fermentador	Sydney et al. (2010)
Scenedesmus obliquus	10	0,29	Erlenmeyer	Tang et al. (2011)
Spirulina platensis	10	0,32	Fermentador	Sydney et al. (2010)
Spirulina platensis	15	0,92	Membrana de fibra oca	Kumar et al. (2010b)
Spirulina sp. LEB-18	18	0,21	Raceway	Rosa et al. (2011)
Spirulina sp.	12	0,41	Tubular vertical em série	Morais e Costa (2007a)
Synechococcus nidulans	12	0,78	Tubular vertical em série	Radmann et al. (2011)

FONTE: HENRARND (2013)

4.6 DESSULFURIZAÇÃO DE BIOGÁS

O H₂S é um gás incolor, tóxico, possui um odor característico de “ovo podre” e é altamente corrosivo, o que impossibilita a utilização do biogás bruto principalmente nos processos de geração de energia elétrica. A remoção do H₂S acontece nos primeiros estágios da purificação do Biogás e segundo Müller (2014) a purificação pode acontecer por processos biológicos durante a fase de digestão ou processos não biológicos após a digestão. Ainda, informa que a principal vantagem dos processos biológicos é o baixo custo de implantação e operação.

Segundo Castro (2022) o biogás é purificado em fotobiorreatores pela fixação fotossintética de CO₂ por microalgas e na liberação de O₂ para o meio líquido de

cultivo, em seus estudos a autora demonstra resultados expressivos na purificação de biogás brutos, com redução de 98% para CO₂ e 100% para H₂S em um fotobioreator conectado a uma coluna de absorção, utilizando uma cultura de *Chlorella sorokiniana*.

Andrade (2018) demonstrou em seus estudos a alta capacidade de biofixação simultânea de GEEs (Gases de Efeito Estufa) e produção de proteínas e lipídeos em cultura de microalgas (espécies analisadas: *Chlorella vulgaris*, *Haematococcus pluvialis* e *Scenedesmus subspicatus*) com injeção de gás em concentrações próximas as emissões de usinas termoelétricas a carvão e gás natural.

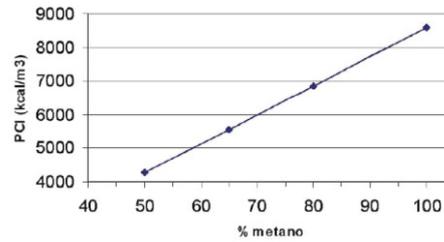
4.7 PODER CALORÍFICO

Matsuoka (2015) define o poder calorífico de um combustível como sendo a quantidade de energia liberada durante o processo de combustão pela unidade de massa ou volume do material, considerando:

- Poder Calorífico Inferior (PCI): Quantidade de energia efetivamente disponibilizada por unidade de massa ou volume de combustível, desconsiderando a energia desprendida com a evaporação da água.
- Poder Calorífico Superior (PCS): Corresponde a energia total liberada pelo combustível e pela água condensada na mistura

O poder calorífico do biogás depende da concentração de metano no gás. Frequentemente o poder calorífico para o biogás com 60% (v/v) de metano é de 5.500 kcal/m³. Entretanto, após os processos de purificação o valor pode se aproximar ao do metano puro, ou seja, 9.000 kcal/m³, a FIGURA 5 demonstra a o incremento do poder calorífico do biogás conforme a variação percentual de metano. Leal (2016) destaca que além da concentração de metano a presença de substâncias não combustíveis, água e dióxido de carbono por exemplo, prejudicam o processo de queima e torna o biogás menos eficiente por absorverem parte da energia gerada, desta forma quanto maior for a concentração e impurezas menor será o poder calorífico do biogás.

FIGURA 5: Poder calorífico do biogás relacionado a variação percentual de metano



FORNTE: LEAL (2016)

A capacidade de geração de energia do biogás está diretamente relacionada a quantidade de Metano (CH_4) presente em sua composição, o que determina seu poder calorífico. Conforme demonstrado na TABELA 15, quanto maior o percentual de metano presente no biogás maior será o potencial energético:

TABELA 15: Poder calorífico em função da composição do biogás

Composição do Biogás (%)	Peso Específico (kg/Nm^3)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
10% CH_4 – 90% CO_2	1,8393	465,43
40% CH_4 – 60% CO_2	1,4643	2.33852
60% CH_4 – 40% CO_2	1,2143	4.229,98
65% CH_4 – 35% CO_2	1,1548	4.831,14
75% CH_4 – 25% CO_2	1,0268	6.253,01
95% CH_4 – 5% CO_2	0,7768	10.469,60
99% CH_4 – 1% CO_2	0,7268	11.661,02

FORNTE: AVELLAR (2002)

Nos estudos Miyawaki (2020) evidenciou que o biogás purificado por microalgas apresentou uma concentração média de 91% (v/v) de CH_4 com poder calorífico de $8.372 \text{ kcal}/\text{m}^3$, constatou um incremento de $2.780 \text{ kcal}/\text{m}^3$ no poder calorífico do biogás, o que representa um aumento de aproximadamente 33% no potencial energético do biogás. A alta eficiência das microalgas em capturar impurezas foram analisadas por Castro (2022), e conforme dados do TABELA 16 pode-se observar alterações significativas nos fatores que afetam o PCI, como por exemplo: remoções de CO_2 de 42,36% a 72,02% no biogás purificado, e aumento na concentração de comburente (O_2).

TABELA 16: %redução de impurezas do Biogás purificado por microalgas

Biogás	CO_2	CH_4	O_2
Bruto	32%	63,08% ~64,32%	0,17% ~0,71%
Purificado Microalgas	9,15% ~18,46%	71,4% ~ 76,2%	1,24 ~3,26%

FORNTE: CASTRO (2022)

A ANP (Agência Nacional do Petróleo) em sua portaria 128 de agosto de 2001, informa que a presença de CO_2 no biogás reduz o seu poder calorífico, e prejudica a

combustão para utilização veicular. A Norma determina que a poder calorífico deve ser de 8741 kcal.m^{-3} , sendo que porcentagem mínima de metano no gás natural deve ser de 68% (v/v) para a região Norte e de 86% (v/v) para as demais regiões. As concentrações de CO_2 podem variar de região para região, chegando a 18% na região Norte, 5% na região Nordeste e 4% para as demais regiões. Estas diferenças de concentrações entre as regiões estão relacionadas a utilização do gás natural, a norma possui indicadores mais rigorosos para regiões nas quais o produto se destina a utilização veicular.

Pompermayer (2003) correlacionou o biogás com poder calorífico de $5.550 \text{ kcal.m}^{-3}$ ao equivalente de 1.527.778 tEP (tonelada Equivalente de Petróleo), o que representaria 0,82% da produção nacional no ano de publicação do artigo, ressaltou a importância do biogás em relação a várias fontes de energia não renováveis, principalmente carvão mineral e gás natural, cujo potencial de substituição corresponderia, respectivamente, a 72% e 16% de toda a produção nacional

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biogás é um combustível com um conteúdo energético elevado, e tem se tornado uma importante fonte renovável na matriz energética nacional. Está deixando de ser visto como um subproduto e assumindo importante papel econômico, principalmente em propriedades rurais, na geração de energia elétrica, térmica e mecânica. Além disso, apresenta forte contribuição na redução de emissões atmosféricas de gases do efeito estufa.

Temos tecnologias consolidadas para os processos de produção e purificação do biogás, entretanto, ainda existem oportunidades a serem exploradas que poderão agregar valor aos processos produtivos. Conforme apresentado neste estudo, a purificação biológica utilizando microalgas se apresenta com alternativa promissora, devido à alta capacidade de retenção de H_2S e CO_2 . Dessa forma, o rendimento produtivo de biometano é elevado, e as possibilidades de incremento econômico com a implantação de processo secundário de produção de biomassa de microalgas são promissoras.

O desenvolvimento e pesquisas para utilização de biomassa de microalgas precisam ser incentivados, de modo a vencer barreiras atuais de custo de implantação e operação, e possibilite a implantação de plantas industriais de produção em média

e larga escala que atraiam investimentos de grandes mercados, como por exemplo: Biocombustíveis, Cosméticos, Biomedicina e Nutrição (humana e animal) entre outras oportunidades.

REFERÊNCIAS

- Andrade, W.L.B.; 2018; **Biofixação de Gases de Efeito Estufa por Microalgas**; Publicação Eletrônica, Programa de Mestrado Profissional em Biotecnologia Industrial da; Universidade Positivo.
- Araujo, A.P.C.; 2017; **Produção de Biogás a Partir de Resíduos Orgânicos Utilizando Biodigestor Anaeróbico**; Publicação Eletrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
- Avellar, L.H.N.; Luczynski E.;2002; **Abordagem Qualitativa da Inserção do Biogás X Diesel para o Meio Rural**, Publicação Eletrônica, Universidade de São Paulo
- Brasil, B.S.A.F.; Garcia, L.C.; 2016; **Microalgas: Alternativas promissoras para a Indústria**; Publicação Eletrônica, Agroenergia em Revista, Ano IV, 10° edição, Embrapa Agroenergia
- Cardoso, L.S.; 2016; **Tratamento de Dejetos Suínos com Microalgas**; Publicação Eletrônica, Agroenergia em Revista, Ano IV, 10° edição, Embrapa Agroenergia
- Castro,A.A.; Horn,B.C.; Becker,C.M.; Oliveira,G.; Konrad, O.; 2022; **Purificação Biológica de Biogás por Processo Fotossintético Utilizando Microalgas**; Publicação Eletrônica, Research, Society and Development, <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35327>
- Castro, A. A.; 2022; **Produção e Purificação de Biogás Utilizando Biotecnologia de Microalgas como Alternativa Energética Renovável**; Universidade Vale do Taquari – Programa de Pós Graduação em Ambiente e Desenvolvimento.
- Castro, A. A.; 2022; **Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água**; Research, Society and Development; v. 11, n.10, ISSN 2525-3409; <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32891>
- Chies V.; 2016; **Microalgas nos Cremes da Natura**; Publicação Eletrônica, Agroenergia em Revista, Ano IV, 10° edição, Embrapa Agroenergia
- Chies V.; 2016; **Captura de Carbono**; Publicação Eletrônica, Agroenergia em Revista, Ano IV, 10° edição, Embrapa Agroenergia
- Chijo, A.C; Nascimento, L.B.; 2021; **Viabilidade do Uso de Biogás Gerado por Biodigestor como Fonte de Energia Térmica em Propriedades Rurais**; Publicação Eletrônica; Universidades São Judas Tadeu.
- Cremonez, P.A.; Feiden, A.; Zenatti, D.C.; Camargo,M.P.; Nadaleti,W.C.; Rossi,E.; Antonelli,J.;2013; **Biodigestão Anaeróbica no Tratamento de Resíduos Lignocelulósicos**; Publicação Eletrônica; Revista Brasileira de Energias Renováveis
- Dalpaz R.; 2019; **Avaliação Energética do Biogás com Diferentes Percentuais de Metano na Produção de Energia Térmica e Elétrica**; Publicação Eletrônica,

Universidade do Vale do Taquari, Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* Mestrado em Sistemas Ambientais Sustentáveis

Derner, R.B.; Ohse, S.; Villela, M.; Carvalho, S.M.; Fett, R.; 2006; **Microalgas, Produtos e Aplicações**; Publicação Eletrônica, Ciência Rural, Santa Maria, v.36, n.6, p.1959-1967

Gomes, G.V.; Suda, S.J.; Rosa, A.P.; Rodrigues, F.A.; 2017; **Estudo da Produção de Energia Elétrica a Partir de Biogás Com e Sem Purificação de Estação de Tratamento de Esgoto**, Publicação Eletrônica, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental

Henrard,A.S.A.; 2013; **Produção e Purificação de Biogás Utilizando Microalga Spirulina sp. LEB-18**; Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Química e Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos

Honório, O.M.; 2009; **Estimativa de Crédito de Carbono da Produção e Queima do Biogás Proveniente de Dejetos Suínos: Estudo de Caso**; Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Junges, E. L.; 2021; **Processo Biológico de Purificação de Biogás Através do Cultivo de Microalgas**, Publicação Eletrônica, Universidade do Vale do Taquari, Programa de Pós-graduação em Ambiente e Desenvolvimento.

Leal G. S; 2016; **Análise Termodinâmica Simplificada de Potencial Energético do Biogás Produzido por Estações de Tratamento de Esgoto**; Publicação Eletrônica; Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.

Lima, A.C.G.; Passamani, F.C.; 2012; **Avaliação do Potencial Energético do Biogás Produzido no Reator UASB da ETE-UFES**, Publicação Eletrônica, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Ambiental

Matsuoka, G. Y.; Hipólito, G.; 2015; **Purificação de Biogás de Aterro Sanitário por Tratamento Químico e Metabolismo de Microalgas**; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Curso de Tecnologia em Processos Ambientais

Miyawaki, B; 2014; **Purificação de Biogás Através de Cultivo de Microalgas em Resíduos Agroindustriais**; Universidade Federal do Paraná, Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia

Miyawaki, B.; Mariano, A.B.;Vargas, J.V.C.; Balmant, W.; Defrancheschi, A.C.; Corrêa D.O.; Santos, B.; Selesu, N.F.H.; Ordonez, J.C.; Kava, V.M.; 2020; **Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment**; Publicação Eletrônica, Renewable Energy, journal homepage: www.elsevier.com/locate/renene

Montoro, S. B.; Santos, D. F. L.; L. J, J.; 2013; **Análise econômica de investimentos que visam à produção de biogás e biofertilizante por meio de biodigestão anaeróbia na bovinocultura de corte.** Revista Eletrônica Mestrado em Administração, v. 5, n. 2, p. 23-34, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/140759>>

Müller, R.; Feiden, A.; Marques, F.S.; Lucio, L.T.; Mari,A.G.; 2014; **Dessulfurização Biológica de Biogás nas Condições Ambientais do Brasil;** Publicação Eletrônica, Brazilian Journal of Biosystems Engineering.

Oliveira, A.J.; Rodrigues, L.S.; Ohama, M.A.; Paixão, M.V.F.; Amarante, M.S.; 2018; **Biogás Como Fonte Energética;** Publicação Eletrônica, Pesquisa e Ação, Universidade Braz Cubas

Pacco, H. C., CORTEZ, L. A. B., NEVES FILHO, L.C.; 2006; **Utilização de Biogás para Resfriamento e Secagem de Hortaliças;** 6° Encontro de Energia no Meio Rural,, Campinas (SP, Brazil)
<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200050&lng=en&nrm=iso>

Pompemayer, R.S; Paula Junior, D. R.; 2023; **Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos;** 3° Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas/SP; <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200055&lng=en&nrm=abn>

Rosa, A.P.; Lobato, L.C.S.; Borges, J.M.; Melo, G.C.B.; Chernicharo, C.A.L.; 2016; **Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB:** estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira); Publicação Eletrônica, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola

Ramaraj R.; Dussadee, N.; Unpaprom y.; 2016; **Cultivation of Green Microalga, Chlorella vulgaris for Biogas Purification;** Publicação Eletrônica: International Journal of New Tecnology na Research (IJNTR); ISSN 2454-4116, Volume 2, Issue-3, pages 117-122

Santos, R.B.;Lima, A.K.C.; 2016. **Análise Comparativa do Biogás: Processo em Biodigestores e de Aterro Sanitário;** Publicação Eletrônica, Universidade de Salvador, Revista Eletrônica de Energia

Santiago, H.S.; Santiago, E.L.G.; 2019; **Potencial energético utilizando a produção de biogás em tratamento de esgoto;** Publicação Eletrônica, Engineering Sciences, www.sutenere.co

Silva, C. B.; 2017; **Abordagem Teórica do processo de Geração de Biometano a partir de resíduos Agroindustriais;** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Mestrado em Engenharia de Produção

Silva, M.P.D.; Gloria, J.S.; Panta, D.A.S.; Vieira, G.E.G.; 2020; **Microalgas e a Terceira Geração de Biocombustíveis**: Desafios atuais e Perspectivas Futuras; Publicação Eletrônica, Revista Desafios

Okamura, A.L.; 2013; **Avaliação e Melhoria do Poder Calorífico de Biogás Proveniente de Resíduos Sólidos Urbanos**; Publicação Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental

Torres,A; Pedrosa, J.F.; 2012; **Fundamentos de Implantação de Biodigestores em Propriedades Rurais**; Publicação Eletrônica, Universidade De Pernambuco – Escola Politécnica de Pernambuco

Zanette, A.L.; 2009; **Potencial de Aproveitamento energético do Biogás no Brasil**; Publicação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Planejamento Energético, COPPE,

Zhang, W.; Liu, X.; Liu, J.; Zhao, C.; Sun, S.; Zhao, Y.; 2021; **Biogas slurry nutrient removal and biogas upgrade in co-cultivated microalgae and fungi by induction with strigolactone**; Publicação Eletrônica, www.elsevier.com/locate/algal