

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E DE PETRÓLEO**

**GIULIA ALFRADIQUE AITA GUIMARÃES  
MARIA EDUARDA DE CARVALHO DUNCAN  
MATHEUS ANTONIO GORGES LEANDRO DE ALMEIDA LIMA**

**AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO DE  
BIOMETANO VIA BIOGÁS**

**GIULIA ALFRADIQUE AITA GUIMARÃES**  
**MARIA EDUARDA DE CARVALHO DUNCAN**  
**MATHEUS ANTONIO GORGES LEANDRO DE ALMEIDA LIMA**

**AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO DE BIOMETANO  
VIA BIOGÁS**

Projeto Final apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química, oferecido pelo departamento de Engenharia Química e de Petróleo da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química.

**ORIENTADORES**

Prof. Dr. André Von Held Soares

Prof. Dr. Diego Martinez Prata

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

G963a Guimarães, Giulia Alfradique Aita  
Avaliação da ecoeficiência da produção de biometano via  
biogás / Giulia Alfradique Aita Guimarães, Maria Eduarda de  
Carvalho Duncan, Matheus Antonio Gorges Leandro de Almeida  
Lima ; André Von Held Soares, orientador ; Diego Martinez  
Prata, coorientador. Niterói, 2022.  
103 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia  
Química)-Universidade Federal Fluminense, Escola de  
Engenharia, Niterói, 2022.

1. Simulação por computador. 2. Biogás. 3. Aterro  
sanitário. 4. Ecoeficiência. 5. Produção intelectual. I.  
Duncan, Maria Eduarda de Carvalho. II. Lima, Matheus Antonio  
Gorges Leandro de Almeida. III. Soares, André Von Held,  
orientador. IV. Prata, Diego Martinez, coorientador. V.  
Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. VI.  
Título.

CDD -

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

**GIULIA ALFRADIQUE AITA GUIMARÃES  
MARIA EDUARDA DE CARVALHO DUNCAN  
MATHEUS ANTONIO GORGES LEANDRO DE ALMEIDA LIMA**

**AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO DE  
BIOMETANO VIA BIOGÁS**

Projeto Final apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química, oferecido pelo departamento de Engenharia Química e de Petróleo, da Escola de Engenharia, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 28 de janeiro de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**



---

André von Held Soares, D.Sc. – TEQ-UFF

**Presidente da Banca - Orientador**



---

Diego Martinez Prata, D.Sc. – TEQ-UFF - Orientador



---

Ana Carla da Silveira Lomba Sant'Ana Coutinho, D.Sc. – TEQ-UFF



---

Alessandra da Rocha Duailibe Monteiro, D.Sc. – TEQ-UFF

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu querido Deus que em graça, amor e misericórdia me conduziu até aqui, *Soli Deo Gloria*.

À minha família, em especial aos meus pais, Plínio e Eliane, por todo cuidado, pelos ensinamentos, suporte e incentivo durante toda a minha vida. Muito obrigada por acreditarem e investirem em mim.

À minha amiga Julya, mais chegada que uma irmã, pela parceria, pelos conselhos e por compartilhar comigo toda a jornada desde o ensino técnico até o fim da nossa graduação.

Aos meus amigos de curso, pelo apoio, carinho e diversão, em especial à Fernanda, Marina e Gabriela, que tornaram a graduação leve e feliz.

Aos professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, que me incentivaram e se dedicaram à minha educação, especialmente à professora Patrícia Davies e ao professor Wanderley Freitas, que me apoiaram de modo extraordinário e se tornaram amigos queridos, tendo minha eterna gratidão.

Agradeço à Universidade Federal Fluminense pela enorme oportunidade e aos educadores que contribuíram para a minha formação, por cada conselho e conhecimento transmitido, principalmente aos professores Rafael Dornellas e Felipe Semaan, que me introduziram à pesquisa, me desafiaram e encorajaram. Um agradecimento especial aos meus orientadores, André Von Held e Diego Martinez Prata, pelo suporte infindável, pela paciência e condução desse trabalho, e às professoras Ana Carla Coutinho e Alessandra Duailibe pelas contribuições e por aceitarem participar da banca avaliadora.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos e parceiros, Maria Eduarda e Matheus, que me acolheram e mostraram total colaboração na produção desse trabalho. Dividir esse projeto com vocês é uma alegria imensa!

*Giulia Alfradique Aita Guimarães*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família e, principalmente, aos meus pais que sempre me apoiaram e deram todo o suporte e auxílio ao longo dessa jornada, além de servirem como fonte de inspiração para o meu crescimento.

Aos amigos de curso, por todos os momentos de descontração e parceria durante esses árduos anos, em especial à Giulia e ao Matheus, que desenvolveram esse trabalho comigo e à Nicole que sempre apoiou toda a turma.

Além disso, gostaria de agradecer à minha amiga Tatiana e ao meu namorado Fabricio que sempre me apoiaram nessa trajetória, me auxiliando nos momentos difíceis da graduação e da vida.

Agradeço à Universidade Federal Fluminense pela oportunidade e aos professores dos quais fui aluna, por todos os conhecimentos e ensinamentos transmitidos, principalmente ao professor Fernando Peixoto e à professora Soraya Ochs. Um agradecimento especial aos meus orientadores, André Von Held e Diego Martinez Prata, que foram incansáveis em me ajudar na realização deste trabalho, e às professoras Ana Carla Coutinho e Alessandra Duailibe por aceitarem participar da banca avaliadora.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

*Maria Eduarda de Carvalho Duncan*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, principalmente meus pais Rodrigo e Adriana, por serem meu porto seguro nessa jornada, me dar todo o apoio possível e me guiarem ao longo desses anos. Obrigado por me incentivar a buscar o conhecimento e perseguir meus sonhos desde criança. Essa conquista é nossa!

Aos meus amigos que fiz ao longo desses anos na faculdade, obrigado por todo o apoio emocional e por enfrentarem todas as dificuldades ao meu lado, além de proporcionarem os melhores anos de minha vida. Um agradecimento especial a Bruna Medeiros e Victoria Laport cuja amizade levarei para o resto da vida.

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Universidade Federal Fluminense e todos meus professores, a minha sincera gratidão por moldarem o meu eu profissional e me ensinarem tanto, não apenas na esfera da engenharia. Sou muito grato de ter tido acesso a educação superior pública de qualidade e ver o quanto ela muda a vida das pessoas.

Aos meus mentores, Alexandre Torres, Carin von Mühlen e João Célio Gervásio, obrigado por serem exemplos de vida profissional, acadêmica e pessoal que irei me inspirar pelos próximos anos. Obrigado por investirem um pouco de seus tempos para me tornar um profissional e um ser humano melhor. Tenho orgulho de ter aprendido com vocês.

Aos meus orientadores, André Von Held e Diego Martinez Prata, obrigado por toda paciência e tempo despendido neste trabalho. Sem suas provocações, indagações e apoio, não seríamos capazes de ter alcançado êxito.

Às minhas colegas de trabalho, obrigado pela perseverança, garra e apoio ao longo desses últimos meses. Foi uma honra dividir esse trabalho com duas amigas fantásticas como vocês.

*Matheus Antonio Gorges Leandro de Almeida Lima*

*“A mudança não virá se esperarmos outra pessoa ou outros tempos. Nós somos aqueles por quem estávamos esperando. Somos a mudança que buscamos.”*

*Barack Obama*

## RESUMO

A sustentabilidade é um tema cada vez mais discutido e almejado por empresas e líderes globais. Esse fato é facilmente justificado pela necessidade de se estabelecer uma relação harmônica entre a humanidade e a natureza sem, no entanto, impactar negativamente a produção e o desenvolvimento dos países. Assim, diversas formas de energias alternativas vêm ganhando notoriedade nas últimas décadas, em especial a biomassa gerada em aterros sanitários. Desse modo, aumentar o uso do biogás proveniente desses espaços tem como principal benefício a transformação do que antes era um passivo ambiental em ativo energético. Nesse contexto, o presente trabalho propõe o estudo da ecoeficiência do processo de beneficiamento do biogás, gerado em aterros sanitários. Para isso, diferentes cenários de composição foram considerados, para a produção de biometano e CO<sub>2</sub> líquidos via simulação computacional, utilizando o *software* Aspen Hysys 2.2. Realizou-se, então, a simulação dos casos propostos, assim como uma análise de sensibilidade visando determinar as condições operacionais mais adequadas para a obtenção, com menores gastos energéticos, de um produto que possa ser caracterizado e comercializado como biometano. Somado a isso, a planta de utilidades necessária à operação do processo foi desenvolvida e simulada, possibilitando o cálculo dos ecoindicadores associados a cada caso e objetivando contabilizar os impactos ambientais e econômicos através dos indicadores de emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de água e dos custos específicos de utilidades. As simulações dos cenários propostos nas condições aprimoradas resultaram em reduções de até 79,59%, 64,27% e 62,50% dos indicadores de consumo de água, custo e emissão de CO<sub>2</sub>, respectivamente, para o cenário que considera o biogás de composição mínima de CH<sub>4</sub>. Somado a isso, os valores calculados para o Índice Comparativo de Ecoeficiência (ICE) e as áreas associadas aos gráficos de radar construídos confirmaram a constatação de que os cenários aprimorados possuem um ganho considerável em ecoeficiência com relação aos processos simulados nas condições do artigo base, atingindo-se valores de ICE de 86,58% e 90,85% para os casos BA<sub>T</sub> aprimorado e BMin aprimorado, respectivamente.

**Palavras-chave:** Biogás. Biometano. Ecoeficiência. Ecoindicadores. Simulação computacional.

## ABSTRACT

Sustainability is a topic increasingly discussed by companies and global leaders. This fact is easily justified by the need to establish a harmonious relationship between humanity and nature without negatively impacting the production and development of countries. Thus, lots of alternative energy forms have been gaining notoriety in recent decades, especially biomass generated in landfills. Hence, increasing the use of biogas from these spaces has the main benefit of transforming what was previously an environmental liability into an energy asset. In this context, the present paper proposes the study of the eco-efficiency of the biogas beneficiation process, generated in landfills. Different composition scenarios were considered to produce biomethane and liquid CO<sub>2</sub> through computer simulation, using the software Aspen Hysys 2.2. The proposed cases simulation was then carried out, as well as a sensitivity analysis aimed at determining the most suitable operating conditions for obtaining, with lower energy expenditure, a product that can be characterized and marketed as biomethane. Added to this, the utility plant necessary for the operation of the process was developed and simulated, enabling the calculation of ecoindicators associated with each case and aiming to account for the environmental and economic impacts through indicators of CO<sub>2</sub> emission, water consumption and specific utility costs. For the scenario that considers biogas from minimum CH<sub>4</sub> composition under the improved conditions, reductions of up to 79.59%, 64.27% and 62.50% were presented in the indicators of water consumption, specific utility costs and CO<sub>2</sub> emission, respectively. In addition, calculated values for the Eco-efficiency Comparison Index (ECI) and areas associated with the constructed radar charts confirmed the finding that the improved scenarios have a considerable eco-efficiency gain in relation to the processes simulated under the conditions of the base article, reaching ECI values of 86.58% and 90.85% for the improved BA<sub>T</sub> and improved BMin scenarios, respectively.

**Keywords:** Biogas. Biomethane. Eco-efficiency. Eco-indicators. Computational Simulation.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 CONTEXTO	15
1.2 OBJETIVO	17
1.3 ESTRUTURA	17
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA GLOBAL E BRASILEIRA	19
2.2 GÁS NATURAL	24
2.3 BIOGÁS	26
2.3.1 Definição e potencial	26
2.3.2 Digestão anaeróbica e suas etapas	28
2.3.3 Utilidade	31
2.3.4 Tipos de resíduos utilizados como substrato	33
2.4 ATERRO SANITÁRIO	36
2.5 TRATAMENTO DO BIOGÁS	40
2.5.1 Remoção de material particulado	41
2.5.2 Desumidificação	42
2.5.3 Dessulfurização	42
2.5.4 Adsorção por variação de pressão	46
2.5.5 Separação por membranas	47
2.5.6 Criogenia	47
2.6 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS NA PRODUÇÃO DE BIOMETANO	49
<b>DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO</b>	<b>51</b>
3.1 PROCESSO PROPOSTO PELO ARTIGO BASE	51
3.1.1 Seção de entrada	53
3.1.2 Seção de compressão e resfriamento	53
3.1.3 Seção Criogênica: coluna de destilação C1	53
3.1.4 Seção Criogênica: coluna de destilação C2	54
3.1.5 Seção da unidade de compressão-expansão do nitrogênio	54
3.1.6 Seção de saída	54
3.2 PROCESSO MODIFICADO	55
3.2.1 Seção de Entrada	55
3.2.2 Seção de compressão e resfriamento	55
3.2.3 Seção Criogênica: coluna de destilação C1	56

3.2.4 Seção Criogênica: coluna de destilação C2	56
3.2.5 Seção da unidade de compressão-expansão do nitrogênio	57
3.3 PLANTA DE UTILIDADES	57
3.4 ECOEFICIÊNCIA	58
<b>METODOLOGIA</b>	<b>60</b>
4.1 MODELO TERMODINÂMICO	60
4.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE REFERÊNCIA	61
4.3 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS	62
4.4 SIMULAÇÃO DA PLANTA DE UTILIDADES	63
4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	65
4.6 ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA	67
4.7 ÍNDICE COMPARATIVO DE ECOEFICIÊNCIA	70
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>72</b>
5.1 SIMULAÇÕES NAS CONDIÇÕES DO ARTIGO DE REFERÊNCIA	72
5.1.1 Cenário de referência - composição máxima de metano	72
5.1.2 Cenário do biogás - Aterro em Caieiras-SP	77
5.1.3 Cenário do biogás - composição mínima de metano	78
5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	80
5.3 SIMULAÇÕES NAS CONDIÇÕES APRIMORADAS	82
5.3.1 Cenário do biogás - Aterro em Caieiras-SP	83
5.3.2 Cenário do biogás - composição mínima de metano	85
5.4 PLANTA DE UTILIDADES	87
5.5 ECOINDICADORES	88
5.6 AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA – ICE	90
<b>CONCLUSÃO</b>	<b>93</b>
6.1 CONCLUSÕES	93
6.2 RECOMENDAÇÕES	94
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Crescimento do PIB mundial e aumento da temperatura global: 1880 – 2018.	20
<b>Figura 2.2</b> – Crescimento da população mundial e emissões globais de CO <sub>2</sub> : 1880 - 2016.	20
<b>Figura 2.3</b> – Evolução da estrutura da oferta de energia no Brasil: 1970-2030.	22
<b>Figura 2.4</b> – Comparação do consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no Mundo em 2018.	23
<b>Figura 2.5</b> – Distribuição percentual das reservas nacionais provadas de gás natural por Unidade da Federação em 2014.	25
<b>Figura 2.6</b> – Reservas provadas de gás natural no mundo.	26
<b>Figura 2.7</b> – Infográfico sobre a oferta interna de energia e de biogás no Brasil.	28
<b>Figura 2.8</b> – Esquema representativo das reações que compõem a biodigestão anaeróbica.	29
<b>Figura 2.9</b> – Formas de uso comercial do biogás.	32
<b>Figura 2.10</b> – Produção média de biogás por substrato (mil Nm <sup>3</sup> /dia).	34
<b>Figura 2.11</b> – Potência instalada de biogás por substrato no Brasil em 2016.	35
<b>Figura 2.12</b> – Esquema representativo de um aterro sanitário.	38
<b>Figura 2.13</b> – Esquema de um poço vertical.	39
<b>Figura 2.14</b> – Esquema de um dreno horizontal.	39
<b>Figura 2.15</b> – Cadeia de Valor do Biogás.	41
<b>Figura 3.1</b> – Fluxograma do processo de produção de biometano via destilação criogênica.	52
<b>Figura 5.1</b> – Simulação do cenário de referência.	73
<b>Figura 5.2</b> – Simulação do ciclo de nitrogênio para o cenário de referência.	75
<b>Figura 5.3</b> – Análise de sensibilidade para o cenário de biogás de Caieiras-SP.	80
<b>Figura 5.4</b> – Análise de sensibilidade para o cenário de biogás com composição mínima.	81
<b>Figura 5.5</b> – Simulação da planta de utilidades.	87
<b>Figura 5.6</b> – Gráficos de radar do Índice Comparativo de Ecoeficiência.	91

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Classificação, por substrato, das plantas de biogás com fins energéticos em operação no Brasil em 2019.	33
<b>Tabela 2.2</b> – Classificação por aplicação energética do biogás das plantas em operação no Brasil em 2019.	33
<b>Tabela 2.3</b> – Plantas de Biogás em operação em 2019 no Brasil que produzem biometano como aplicação energética principal.	34
<b>Tabela 2.4</b> – Quantidade de municípios brasileiros por tipo de destinação final dos RSUs em 2017.	37
<b>Tabela 2.5</b> – Vantagens e desvantagens das tecnologias de dessulfurização de biogás.	45
<b>Tabela 3.1</b> – Valores heurísticos adotados para a planta de utilidades.	58
<b>Tabela 4.1</b> – Metodologia para a simulação do processo de referência.	62
<b>Tabela 4.2</b> – Metodologia para a simulação dos cenários propostos.	63
<b>Tabela 4.3</b> – Metodologia para a simulação da planta de utilidades.	64
<b>Tabela 4.4</b> – Metodologia para a análise de sensibilidade.	65
<b>Tabela 4.5</b> – Metodologia para o aprimoramento da análise de sensibilidade.	66
<b>Tabela 4.6</b> – Valores de custos com utilidades.	70
<b>Tabela 5.1</b> – Resultados da simulação para o cenário de referência.	74
<b>Tabela 5.2</b> – Resultados de simulação para o ciclo de nitrogênio.	76
<b>Tabela 5.3</b> – Resultados da simulação para o cenário de Caieiras-SP.	77
<b>Tabela 5.4</b> – Resultados da simulação para o cenário de biogás com composição mínima.	79
<b>Tabela 5.5</b> – Resultados da primeira análise de sensibilidade.	81
<b>Tabela 5.6</b> – Resultados da segunda análise de sensibilidade.	82
<b>Tabela 5.7</b> – Resultados da simulação para o cenário de Caieiras-SP aprimorado.	83
<b>Tabela 5.8</b> – Resultados da simulação para o cenário aprimorado de biogás com composição mínima.	85
<b>Tabela 5.9</b> – Resultados da planta de utilidades para os cenários propostos.	88
<b>Tabela 5.10</b> – Resumo dos valores de energia por equipamentos.	89
<b>Tabela 5.11</b> – Resultados dos ecoindicadores.	89
<b>Tabela 5.12</b> – Resultados obtidos para os ecoindicadores normalizados.	90
<b>Tabela 5.13</b> – Resultados obtidos para a comparação da ecoeficiência entre os cenários.	91

## LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABRELPE	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BA <sub>T</sub>	Biogás com Composição do Aterro de Caieiras - SP
BA <sub>T</sub> Aprimorado	Biogás com Composição do Aterro de Caieiras – SP – Aprimorado
BMC	Biometano Comprimido
BMin	Biogás com Composição Mínima de Metano
BMin Aprimorado	Biogás com Composição Mínima de Metano – Aprimorado
BML	Biometano Liquefeito
BPR	Biogás com Composição do Processo de Referência
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCE	Centro para Conservação de Energia
CDE	<i>Carbon Dioxide Equivalent</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
C <sub>EE</sub>	Custo de Energia Elétrica
CEU	Custo Específico de Utilidades
C <sub>GN</sub>	Custo do Gás Natural
CIBiogas	Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP-21	Conferência das Partes (2021)
C <sub>PW</sub>	Custo de Água de Processo
C <sub>ICW</sub>	Custo de Tratamento de água de resfriamento
C <sub>IHPW</sub>	Custo de Água de Alta Pureza

$C_{tSG}$	Custo de Tratamento de água para vapor
$C_{tww}$	Custo de Tratamento de Efluentes
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FMI	Fundo Monetário Internacional
$F_{tresf}$	Vazão Volumétrica de Entrada de Água na Torre de Resfriamento
GEEs	Gases de efeito estufa
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
ICE	Índice Comparativo de Ecoeficiência
ICLEI	Governos Locais pela Sustentabilidade
iNDCs	<i>Intended Nationally Determined Contributions</i>
LASSU	Laboratório de Sustentabilidade da Universidade de São Paulo
LBM	<i>Liquefied Biomethane</i>
LCO <sub>2</sub>	<i>Liquefied Carbon Dioxide</i>
$Makeup_{resf}$	Corrente de água para a reposição de perdas no sistema de resfriamento
$Makeup_{vap}$	Corrente de água para a reposição de perdas no sistema de aquecimento
$m_{arraste}$	Perdas na Torre de Resfriamento por Arraste
$m_{cw}$	Vazão Volumétrica da Torre de Resfriamento
$m_{CO_2}$ (flare)	Vazão Mássica de CO <sub>2</sub> no <i>Flare</i>

MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
$m_{\text{evap}}$	Perdas na Torre de Resfriamento por Evaporação
$m_{\text{HPW}}$	Vazão Volumétrica de Água de Alta Pureza
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPGO	Ministério Público do Estado de Goiás
$m_{\text{PWW}}$	Vazão de Efluentes de Processo
$m_{\text{SG}}$	Vazão Volumétrica de Água para Geração de Vapor
$m_{\text{total}}$	Vazão Volumétrica Total de Água para Utilidades
$m_{\text{WW}}$	Vazão Volumétrica de Efluentes
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NRTL	<i>Nonrandom two-liquid model</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
P	Pressões de Operação
$P_{\text{air}}$	Consumo de Energia Elétrica nos Refrigeradores a Ar
$P_{\text{bombas}}$	Consumo Total de Eletricidade das Bombas
$P_{\text{comp}}$	Consumo Total de Eletricidade dos Compressores
$P_{\text{tresf}}$	Consumo Total de Eletricidade da Torre de Resfriamento
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PIB	Produto Interno Bruto
PPGB-UFPR	Programa de Pós-Graduação em Bioenergia da Universidade Federal do Paraná
PROBIOGAS	Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

PRs	Pontos de Regularização de Fluxo
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
$P_{\text{tresf}}$	Consumo Energético Associado à Operação dos Ventiladores da Torre de Resfriamento
$Q_{\text{cald}}$	Consumo de Energia da caldeira
$Q_{\text{fornalha}}$	Consumo de Energia da fornalha
RCEs	Reduções Certificadas de Emissões
RR	Razão de Refluxo
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
$S_{\text{MAX}}$	Área do maior gráfico obtido no ICE
SRK	<i>Soave-Redlich-Kwong</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention On Climate Change</i>
UNIQUAC	<i>UNIversal QUAsiChemical</i>
UVS	Unidade de Valorização Sustentável
VUT	<i>Vienna University of Technology</i>
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WC	<i>Water Consumption</i>
WGC	<i>World Gas Conference</i>
$X_{\text{CH}_4}$	Fração molar de metano
$X_{\text{CO}_2}$	Fração molar de dióxido de carbono
$X_{\text{H}_2\text{S}}$	Fração molar de sulfeto de hidrogênio
$\theta_{\text{cald}}$	Eficiência Energética Durante a Queima de Combustível na Caldeira
$\eta$	Eficiência Energética Durante a Queima de Combustível na Fornalha
$\xi_{\text{ele}}$	Fator de Emissão Indireta de CO <sub>2</sub> por Eletricidade
$\xi_{\text{comb}}$	Fator de Emissão Direta de CO <sub>2</sub> por Combustão

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONTEXTO**

A busca pela sustentabilidade é um tema cada vez mais discutido por empresas e líderes globais, fato que é facilmente justificado pela necessidade de se estabelecer uma relação harmônica entre a humanidade e a natureza sem, no entanto, impactar negativamente a produção e o desenvolvimento dos países.

Uma das definições mais comuns para o desenvolvimento sustentável faz referência aos três pilares: econômico, ambiental e social. O pilar econômico faz menção aos temas ligados à produção, distribuição e consumo de bens e serviços. Já o pilar ambiental relaciona-se à preservação do meio ambiente e o pilar social refere-se ao capital humano de um empreendimento, comunidade e sociedade como um todo. Todos os três pilares são importantes e o ponto de interseção entre eles é essencial para a construção do desenvolvimento sustentável (LASSU, 2021).

A esse respeito, em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou um plano para a Agenda 2030 com a intenção de promover a prosperidade para as pessoas e para o planeta. Nele são citados 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que fazem um apelo urgente a todos os países - desenvolvidos e em desenvolvimento - em uma parceria global. Eles reconhecem que a erradicação da pobreza e outras privações devem ser acompanhadas de estratégias que melhorem a saúde e a educação, reduzam a desigualdade e estimulem o crescimento econômico, ao mesmo tempo em que medidas para preservar as florestas e oceanos e enfrentar as mudanças climáticas são realizadas. Dessa forma, esse plano busca contemplar medidas relacionadas aos três pilares do desenvolvimento sustentável (ONU, 2021).

Dentre os objetivos de desenvolvimento sustentável é possível destacar quatro:

- Ação contra a mudança global do clima: tomar ações urgentes no combate às mudanças climáticas e aos seus impactos;
- Energia limpa e acessível: garantir acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos;
- Cidades e comunidades sustentáveis: tornar as cidades e as comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis;
- Consumo e produção responsáveis: garantir padrões de consumo e produção sustentáveis.

Esses quatro pontos estão intrinsecamente ligados entre si no que diz respeito à necessidade de buscar novos processos de obtenção de energia, de forma a evitar desperdícios e minimizar a emissão de gases do efeito estufa (GEEs), responsáveis por agravar os efeitos do aquecimento global, além de propiciar melhor qualidade de vida à população.

Nesse sentido, muitas ações públicas e privadas vêm sendo realizadas na intenção de reduzir a emissão de GEEs e de promover um desenvolvimento sustentável. Novas tecnologias e modelos de produção vêm sendo desenvolvidos, principalmente no setor de geração de energia, grande responsável pela emissão de gases poluentes (CLIMATE WATCH, 2021).

Assim, diversas formas de energias alternativas, menos poluentes e renováveis vêm ganhando notoriedade nas últimas décadas, como a energia solar, eólica, hidráulica, biomassa, dentre outras.

A biomassa pode ser definida como a matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. No século XIX, a biomassa comumente utilizada estava na forma de lenha ou carvão e, no século XX, ela sofreu o chamado “processo de modernização” e outras formas de utilização da biomassa surgiram, como a proveniente do bagaço de cana-de-açúcar, da madeira, da casca de arroz, do biogás, entre outras. Uma das grandes vantagens de sua utilização é a redução dos impactos ambientais, na maioria das vezes, por se adotar substratos menos poluentes do que os combustíveis fósseis e por reutilizar subprodutos que seriam descartados (GOLDEMBERG, 2009).

Dessa forma, este trabalho deu ênfase ao processo de produção de biogás a partir da biomassa proveniente de rejeitos orgânicos dispostos em um aterro sanitário, realizando um estudo sobre uma planta de beneficiamento do biogás à biometano.

## **1.2 OBJETIVO**

Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo da ecoeficiência do processo de beneficiamento do biogás, gerado em aterros sanitários, através da produção de biometano, via simulação computacional. A análise foi realizada de forma comparativa entre três cenários de composição de biogás inicial: um cenário positivo, um negativo e outro real com dados coletados do Aterro Sanitário Caieiras, no estado de São Paulo.

São desenvolvidos aspectos fundamentais como:

1. Simulação da planta de destilação criogênica para a produção de biometano líquido a partir de biogás, considerando três cenários distintos.
2. Simulação da planta de utilidades para os sistemas de resfriamento e aquecimento com água, considerando cada cenário proposto.
3. Cálculo de ecoindicadores de emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de água e custo específico de utilidades para os cenários apresentados.
4. Análise de sensibilidade para determinar as melhores condições de operação da coluna, para os cenários de biogás utilizados.

## **1.3 ESTRUTURA**

Inicialmente, foi apresentada uma breve contextualização sobre sustentabilidade e a utilização de biomassa como forma de energia alternativa e mais limpa, frente aos combustíveis fósseis. Em seguida, mais cinco capítulos são descritos, conforme explicado a seguir.

O segundo capítulo traz a revisão bibliográfica. Serão apresentadas informações sobre as matrizes energéticas brasileira e mundial, características do biogás e de seu processo de produção em aterros sanitários, incluindo as principais reações envolvidas na digestão anaeróbica, o tipo de substrato presente em tais aterros, o funcionamento de um aterro sanitário e o processo de tratamento do biogás captado para a retirada de seus principais contaminantes.

No terceiro capítulo, é apresentado o processo adotado para o beneficiamento do biogás, baseado na planta proposta por Hashemi *et al.* (2019). São descritas as condições operacionais, as composições das correntes de entrada de biogás bruto, assim como os valores heurísticos utilizados na simulação das plantas de utilidades.

No quarto capítulo, a metodologia aplicada para a simulação da planta de produção e de utilidades é discutida e os cálculos dos ecoindicadores são apresentados.

No quinto capítulo serão apresentados os resultados obtidos na simulação computacional, os mesmos serão discutidos conforme os objetivos propostos.

O sexto capítulo abordará as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

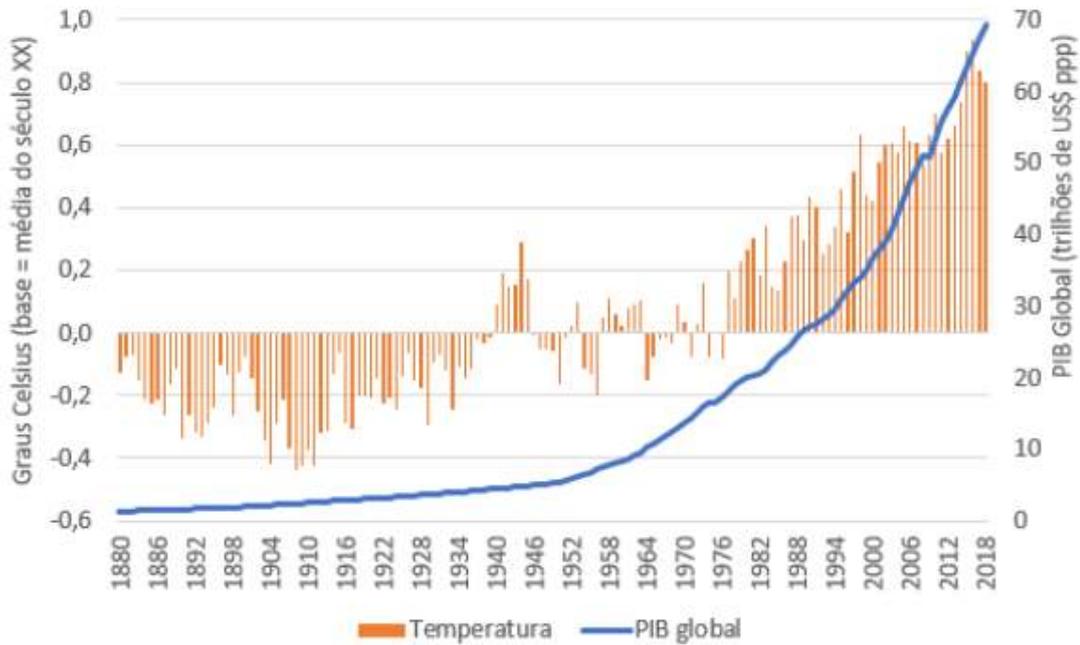
Este capítulo apresenta uma breve discussão acerca da matriz energética em escala global e em âmbito brasileiro. Além disso, são apresentados os aspectos gerais do biogás, as etapas de digestão anaeróbica responsáveis pela sua formação, o conceito de aterro sanitário e resíduos sólidos urbanos.

Posteriormente, são discutidas diversas formas e processos de purificação do biogás, retirando seus principais contaminantes que interferem em seu poder calorífico e energético. Com isso, são discutidas as principais aplicações do biogás tratado.

#### **2.1 MATRIZ ENERGÉTICA GLOBAL E BRASILEIRA**

A demanda energética está fortemente relacionada ao crescimento e ao desenvolvimento econômico dos países, assim como ao seu Produto Interno Bruto (PIB). O aumento populacional resulta em uma maior necessidade de produção de bens de consumo, de alimentos e, conseqüentemente, em maior demanda por energia, o que gera impactos significativos no clima, como demonstrado pela Figura 2.1 (FMI; NOAA, 2019 apud ALVES, 2019).

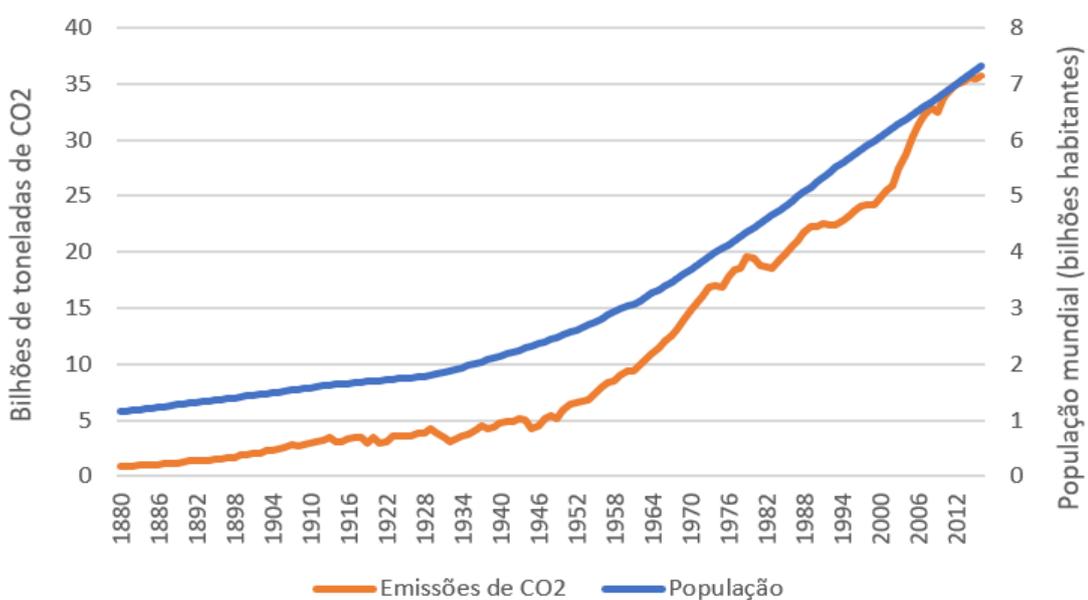
**FIGURA 2.1** - Crescimento do PIB mundial e aumento da temperatura global: 1880 – 2018.



Fonte: Retirado de FMI; NOAA (2019) apud Alves (2019).

Com o aumento da população mundial, nas últimas décadas, é possível observar também o aumento no índice de emissão de gases agravadores do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vide Figura 2.2. Esse fato revela a grande necessidade de investimento em um modelo econômico mais sustentável e que utilize fontes de energia renováveis (GLOBAL CARBON PROJECT, 2019 apud ALVES, 2019).

**FIGURA 2.2** – Crescimento da população mundial e emissões globais de CO<sub>2</sub>: 1880 - 2016.



Fonte: Retirado de Global Carbon Project (2019) apud Alves (2019).

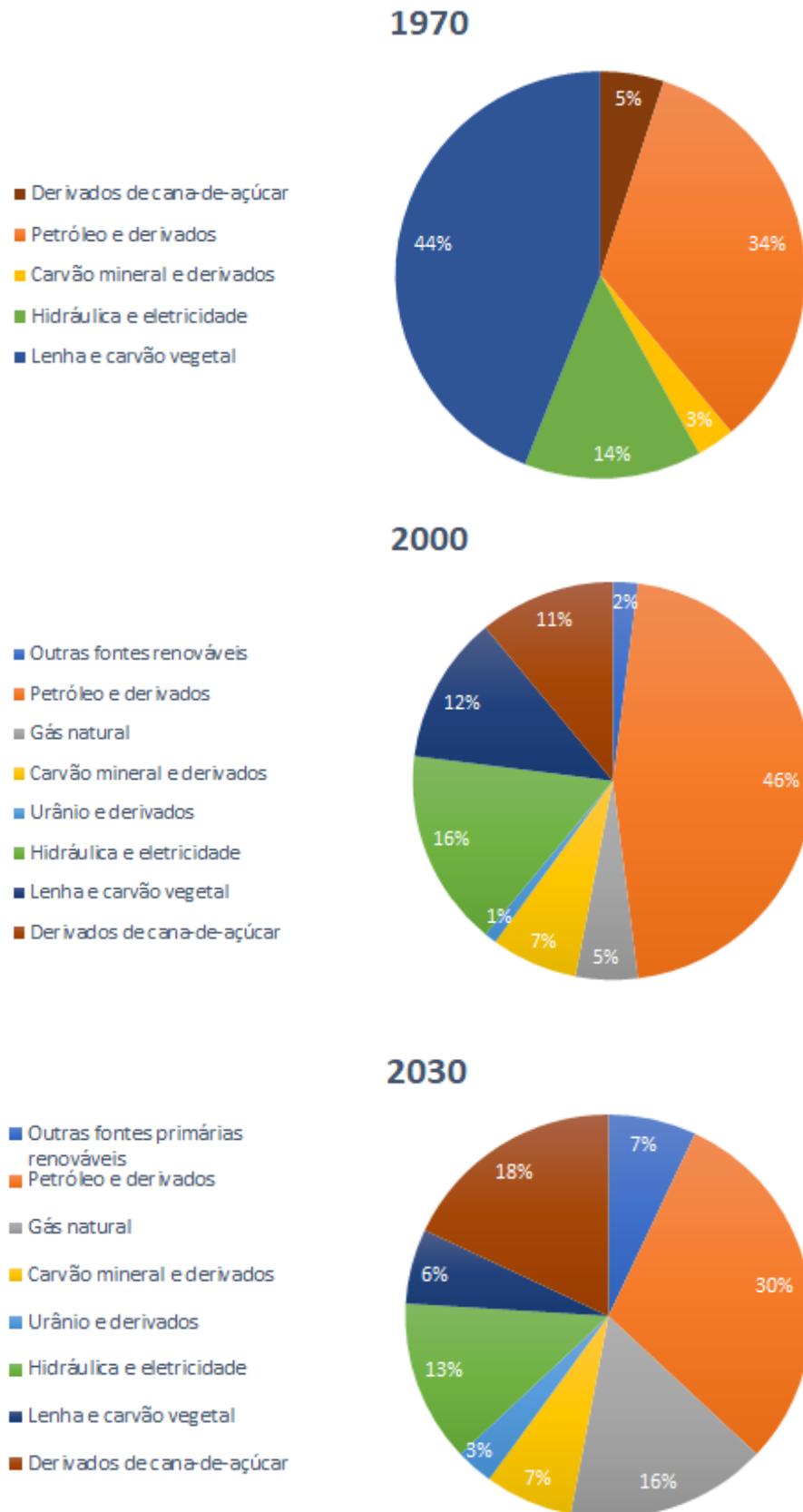
Devido ao aumento da emissão dos GEEs, a intensificação das mudanças climáticas e seus efeitos, incluindo os econômicos, as lideranças globais têm realizado encontros para discutir esse tema. Um exemplo é a 21ª Conferência das Partes da Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (a COP-21 da Convenção do Clima), na qual mais de 190 países assinaram, em Paris no ano de 2015, o primeiro acordo legalmente vinculativo para limitar as mudanças climáticas (LAROVERE, 2021). Nele, visando o desenvolvimento sustentável, foi acordada a redução da emissão dos GEEs, limitando o aumento da temperatura global em no máximo 1,5°C acima da média pré-industrial até 2100. Para isso, o governo de cada país elaborou uma meta através das Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDCs), um documento compilado das medidas que deverão ser adotadas (MMA, 2016 apud LIMA; GONÇALVES, 2016).

Pelas iNDCs do Brasil, o país se compromete a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 e em 43% abaixo dos níveis de 2005 até 2030 (UNFCCC,2016).

Para atingir essa meta, o Brasil está buscando investir cada vez mais em fontes de energia sustentáveis. Em 2019, por exemplo, as fontes renováveis representavam 83% da geração de energia, 46% do consumo de combustível automotivo, e 41% da energia primária no Brasil, este último valor correspondendo a mais de duas vezes e meia a média mundial. Além disso, a produção de biocombustíveis para transporte continua crescendo com o apoio do Programa Renovabio, que utiliza programas de descarbonização do mercado para fomentar a produção e o consumo destes recursos renováveis (UNFCCC, 2016).

É importante salientar também que isso só está sendo possível devido a um histórico de investimento já favorável. Desde a década de 70 o país investe, consistentemente, em energias renováveis, como demonstrado na Figura 2.3.

**FIGURA 2.3** – Evolução da estrutura da oferta de energia no Brasil: 1970-2030.



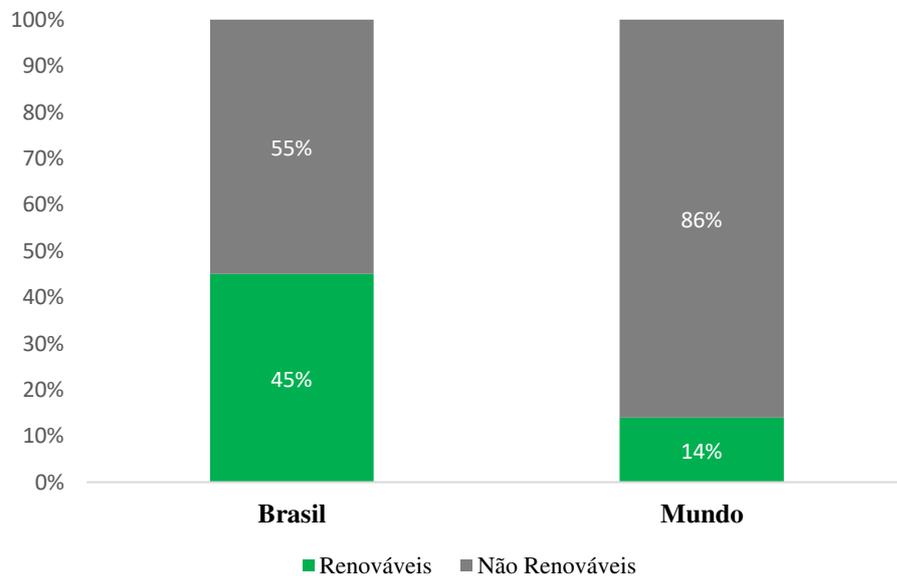
Fonte: Adaptado de EPE (2007) apud Tolmasquim; Guerreiro; Gorini (2007).

É possível observar pela Figura 2.3 que os investimentos iniciais em energias renováveis foram destinados para derivados da cana-de-açúcar (biomassa) e fontes hidráulicas.

Devido ao grande sistema fluvial, com ótimas características hidrológicas para a geração de energia, o Brasil se destaca pela produção hidrelétrica. No entanto, em épocas de chuvas escassas os níveis dos reservatórios tornam-se baixos e as tarifas de energia aumentam. Além disso, as hidrelétricas também causam impactos ambientais e sociais (ENGIE, 2016). Por isso, apesar da matriz energética brasileira já possuir uma grande parcela de fontes renováveis, outras fontes alternativas como a biomassa e o urânio deverão aumentar sua participação na matriz energética, como mostra a previsão para 2030 da Figura 2.3.

Apesar de ainda possuir grande potencial para crescimento, no ano de 2018, constatou-se que o Brasil já apresentava uma das matrizes energéticas mais limpas do planeta, conforme apresentado na Figura 2.4. Enquanto o mundo possui, em média, 86% de energia primária gerada por fontes fósseis, o Brasil tem 45% do seu *mix* energético gerado por fontes renováveis (EPE, 2021).

**FIGURA 2.4** – Comparação do consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no Mundo em 2018.



Fonte: Adaptado de EPE (2021).

É importante destacar também que as fontes de energia como petróleo, carvão e gás natural, atualmente, predominam na matriz energética global – sendo grandes emissoras de GEEs – e, portanto, faz-se necessário a transição energética mundial. Dessa forma, visa-se aumentar a participação de renováveis e reduzir o uso do carvão e petróleo. Além disso, conta-

se com a possibilidade de utilização do gás natural como combustível de transição, visto que se trata de um combustível fóssil menos poluente que permite a sustentação da demanda energética durante esse processo (FGV, 2020).

Nesse cenário, apesar do aumento do consumo de energia decorrente do crescimento populacional e do desenvolvimento dos países, abordado anteriormente, o Brasil possui grande potencial para desenvolver uma matriz energética ainda mais limpa e sustentável. Para que isso seja possível, inovações sustentáveis e eficientes na geração e distribuição de energia devem estar em constante aprimoramento e o uso do gás natural e do biogás devem possuir posição de destaque nesse processo.

## **2.2 GÁS NATURAL**

O gás natural é uma fonte de energia muito versátil e que atende às demandas de inúmeros setores, como o industrial, energético, residencial, comercial e de transportes. Ele pode ser consumido diretamente como matéria-prima e indiretamente, sendo queimado para a geração de eletricidade ou calor. Na indústria e nas edificações é comumente utilizado para gerar calor, enquanto nas usinas termelétricas o gás natural é queimado e a energia térmica é convertida em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica (TOLMASQUIM, 2016).

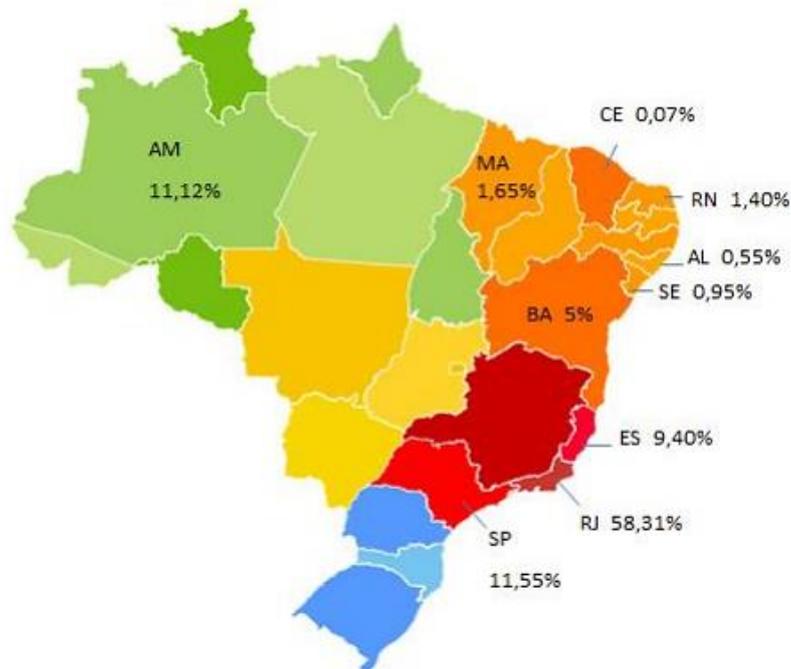
Trata-se de um combustível significativamente importante na matriz energética mundial, principalmente pelo seu papel no processo de transição, propiciando uma geração de energia de baixo carbono. Isso ocorre pelo fato do gás natural ser considerado uma fonte de energia limpa, já que sua queima produz basicamente CO<sub>2</sub> e água, de modo a apresentar menores impactos ambientais quando comparado ao restante dos combustíveis fósseis. Além disso, ele é caracterizado pelo notável poder calorífico, grande estabilidade e segurança no suprimento de energia (WGC, 2015).

Por essas razões, a geração de energia termelétrica a gás natural é uma alternativa para complementar a geração proveniente das fontes renováveis intermitentes, como a eólica, a solar e a hidrelétrica, além de poder ser acionada para o atendimento das demandas de ponta (TOLMASQUIM, 2016).

No Brasil, a maior parte das reservas de gás natural está localizada no mar de forma associada ao petróleo. A região Sudeste dispõe da maior parte das reservas provadas, cerca de

79%, de modo que nessa localidade 58% encontram-se no estado do Rio de Janeiro, 12% em São Paulo e 9% no Espírito Santo (ANP, 2015 apud TOLMASQUIM, 2016). A Figura 2.5 apresenta a distribuição percentual das reservas de gás natural em território brasileiro.

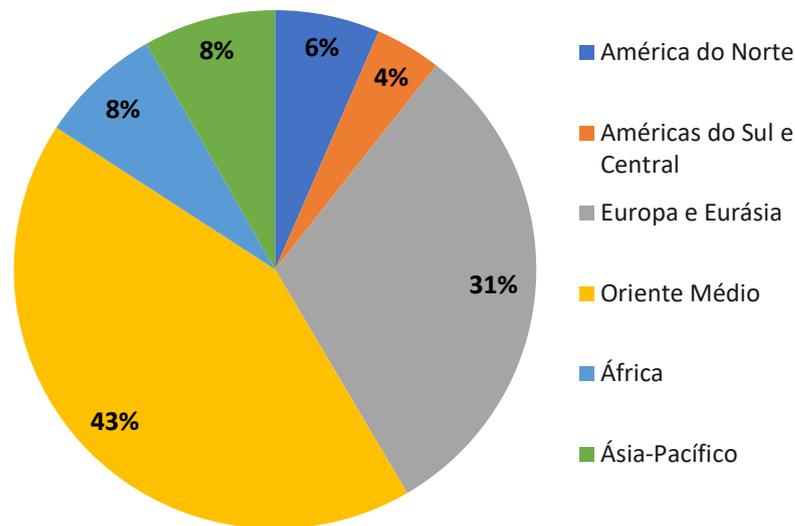
**FIGURA 2.5** – Distribuição percentual das reservas nacionais provadas de gás natural por Unidade da Federação em 2014.



Fonte: Retirado de Tolmasquim (2016).

A produção de gás natural no Brasil cresceu em média 6,8% ao ano no intervalo entre 2005 e 2014, de forma que atingiu o valor de 32 bilhões de m<sup>3</sup> no último ano do período, sendo 6 bilhões provenientes do Pré-sal. (ANP, 2015 apud TOLMASQUIM, 2016). Dessa forma, é notável a importância que esse recurso apresenta no cenário energético nacional.

Apesar de possuir um grande potencial energético, no continente sul-americano, ao qual o Brasil faz parte, o gás natural não ocupa posição de destaque no ranking de reservas mundiais provadas, como mostra a Figura 2.6.

**FIGURA 2.6** - Reservas provadas de gás natural no mundo.

Fonte: Adaptado de BP Energy (2015).

Dessa forma, sabendo da importância que esse recurso possui, uma medida inovadora que pode ser adotada pelo Brasil e que já está sendo aplicada em alguns países do mundo, é a utilização do biogás tratado na rede de gás natural. Além disso, após tratamento, também é possível a aplicação desse produto na substituição ao gás natural veicular, por exemplo.

## 2.3 BIOGÁS

### 2.3.1 Definição e potencial

O biogás é composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono. Sua produção é resultado da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, que se dá através da ação de determinadas espécies de bactérias (CETESB 2020).

Esse gás também pode ser denominado de gás de aterros, gás do lixo, gás de esgotos, gás de lodo, gás de dejetos, entre outros, de acordo com o tipo de material orgânico que o originou (ZANETTE, 2009).

Sua composição pode variar de forma significativa, pois depende do material orgânico utilizado como substrato e dos tratamentos envolvidos no processo. No entanto, de forma

genérica, o biogás produzido em um aterro sanitário é uma mistura gasosa cuja composição molar típica é apresentada a seguir (HASHEMI *et al.*, 2019):

Metano (CH<sub>4</sub>): 45% – 62%

Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): 24% – 40%

Gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S): 15 – 427 ppm

Oxigênio (O<sub>2</sub>): 1% – 2,6%

Nitrogênio (N<sub>2</sub>): 1% – 17%

Além disso, podem estar presentes: vapor d'água, traços de gás hidrogênio, material particulado, compostos orgânicos com silício (siloxanas), entre outros. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de tratar e purificar o gás produzido dependendo do escopo de sua utilização (CANEVER, 2017).

Dentre os componentes referidos na composição do biogás, sabe-se que o metano é um gás combustível, que pode ser utilizado para geração de energia térmica, elétrica e ainda como combustível veicular. Dessa forma, aumentar o emprego do biogás proveniente de rejeitos (agrícolas, industriais e de aterros) tem como principal benefício a transformação do que antes era um passivo ambiental em ativo energético (CIBIOGAS, 2020).

Muitos países identificaram o potencial do biogás, de modo que o seu aproveitamento está sendo cada vez maior, principalmente após o surgimento da possibilidade de obtenção de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), popularmente conhecidas como “créditos de carbono”, negociadas mediante o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (ZANETTE, 2009).

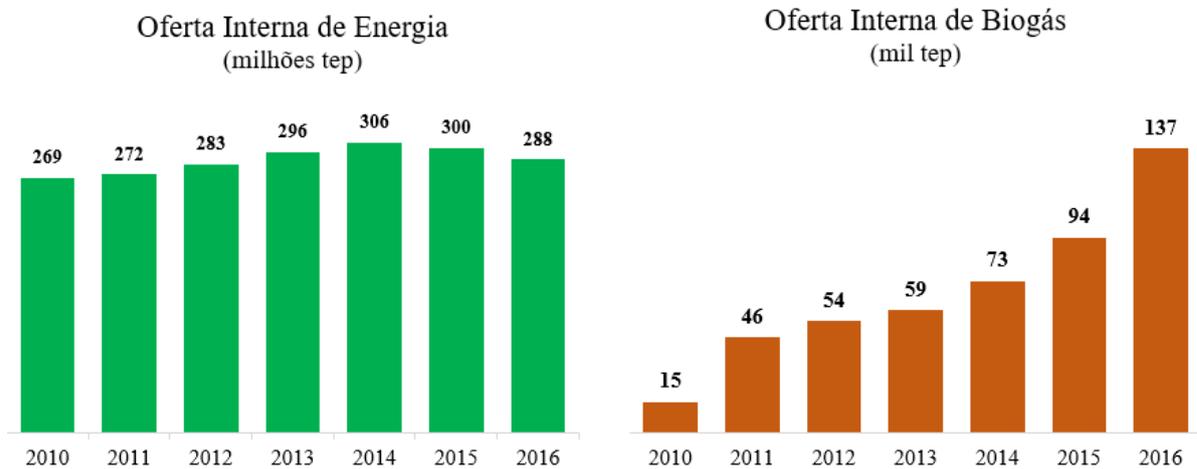
Os projetos do MDL são analisados e aceitos pelo Mercado Internacional de Carbono, que tem como propósito, dentre vários outros, a queima e o aproveitamento energético do biogás gerado nos aterros, que recebem Certificados de Redução de Emissão por cada tonelada métrica de CO<sub>2</sub> não emitida, reduzida ou sequestrada (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

As iniciativas de aproveitamento do biogás no âmbito do MDL totalizaram, em setembro de 2009, uma capacidade projetada de 1300 MW, a maior parte das propostas tem como ponto de partida aterros sanitários e, em menor escala, efluentes industriais e resíduos agropecuários (ZANETTE, 2009).

A demanda e a oferta de energia no Brasil vêm aumentando, assim como a oferta do biogás na matriz energética brasileira, que cresceu consideravelmente nos últimos anos. Enquanto a oferta interna de energia aumentou cerca de 1,2% ao ano no período de 2010 a

2016, a oferta interna de biogás cresceu cerca de 45% ao ano no mesmo período, como pode ser observada na Figura 2.7. Assim, a participação do biogás na oferta interna de energia saiu de cerca de 0,01% em 2010 para 0,05% em 2016.

**Figura 2.7** – Infográfico sobre a oferta interna de energia e de biogás no Brasil.



Fonte: Adaptado de EPE apud COELHO (2017).

Já na matriz elétrica brasileira, a biomassa, no ano de 2016, teve uma contribuição significativa de 8%, equivalente a 50 TWh, perdendo apenas para o gás natural (9%) e hidráulica (68%). Do total de biomassa ofertada neste ano, 89% vieram do bagaço da cana-de-açúcar, 10% de outras fontes e 1% de biogás (COELHO, 2017).

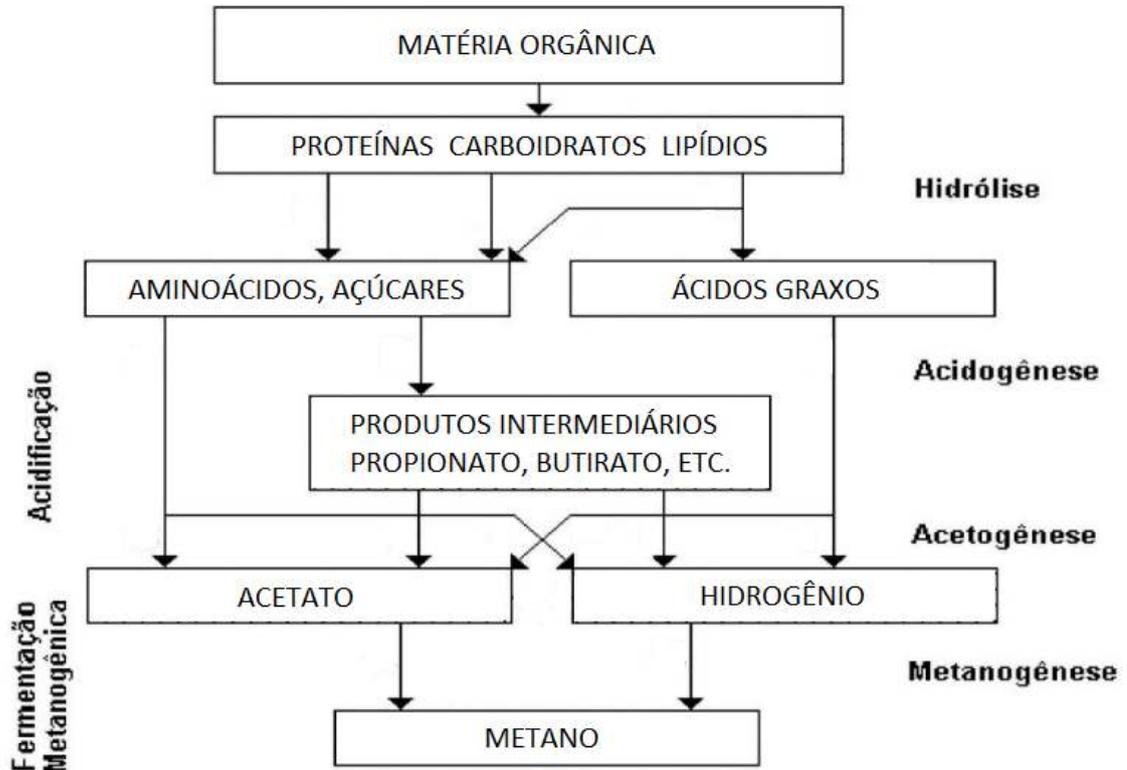
### 2.3.2 Digestão anaeróbica e suas etapas

A digestão anaeróbica pode ser utilizada para o tratamento de materiais de origem orgânica. Uma de suas principais aplicações em larga escala é o tratamento de resíduos urbanos, agropecuários, de efluentes domésticos e industriais (ZANETTE, 2009).

Esse processo, além de resultar na produção do biogás, gera um resíduo líquido rico em minerais que pode ser utilizado como biofertilizante. A digestão anaeróbica é comumente subdividida em 4 partes: a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese (PORTAL DO BIOGÁS, 2021a).

A Figura 2.8 fornece uma representação do processo de geração de biogás através das quatro etapas apresentadas.

**FIGURA 2.8** - Esquema representativo das reações que compõem a biodigestão anaeróbica.



Fonte: Adaptado de PPGb-UFPR (2018).

Na biodigestão, a primeira etapa é caracterizada pela hidrólise dos carboidratos, proteínas e gorduras provenientes da matéria orgânica. Trata-se de um processo bioquímico conduzido por bactérias hidrolíticas, essas são responsáveis pela liberação de enzimas que promovem a quebra das ligações moleculares originando compostos orgânicos simples, com menor peso molecular, ou seja, aminoácidos, ácidos graxos e açúcares (PARKIN e OWEN, 1986).

As proteínas, peptídeos e polipeptídeos, são degradados formando assim os aminoácidos. Já os carboidratos são transformados em mono e dissacarídeos, açúcares solúveis. Por fim, os lipídios, compostos majoritariamente por triacilglicerídeos, são convertidos em ácidos graxos de cadeia carbônica longa (PROBIOGAS, 2010).

Esses monômeros são capazes de transpor as paredes celulares dos microrganismos, o que permite a sequência de reações, dessa forma, a velocidade do processo de digestão será dependente da taxa de hidrólise (PARKIN e OWEN, 1986). Nessa etapa, não há a obrigatoriedade da ausência de oxigênio, os microrganismos podem ser anaeróbios facultativos ou obrigatórios (PORTAL DO BIOGÁS, 2021a).

Posteriormente, na etapa de acidogênese, as substâncias resultantes da hidrólise são transformadas por bactérias fermentativas em ácido propanóico, ácido butanóico, entre outros ácidos de cadeia curta, assim como hidrogênio e gás carbônico (PROBIOGAS, 2010). Os microrganismos que atuam nesse estágio podem ser anaeróbios facultativos ou obrigatórios (PARKIN e OWEN, 1986). Nessa etapa, a quantidade de hidrogênio é um fator que influencia diretamente a formação de produtos (PROBIOGAS, 2010), visto que se trata de um inibidor para a maioria dos microrganismos responsáveis pela acidogênese, de modo que, os tipos de compostos gerados dependerão da concentração de H<sub>2</sub> presente no meio (PARKIN e OWEN, 1986).

Na acetogênese, o material resultante do estágio anterior é transformado, através da ação de bactérias acetogênicas, em ácido acético, hidrogênio e gás carbônico, precursores do biogás. Trata-se de um estágio que apresenta grande sensibilidade, visto que a concentração de hidrogênio no meio interfere diretamente na conversão dos compostos provenientes da acidogênese. Elevadas concentrações de H<sub>2</sub> desfavorecem termodinamicamente as reações, impedindo a conversão e resultando no acúmulo de compostos ácidos que inibem a etapa seguinte de metanogênese (PROBIOGAS, 2010).

Dessa forma, para que seja mantido o equilíbrio entre a quantidade de hidrogênio gerada e consumida, é essencial que as bactérias acetogênicas, produtoras de hidrogênio, estejam sempre associadas com as arqueas metanogênicas, consumidoras de H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> (PROBIOGAS, 2010).

A etapa de metanogênese é realizada por diferentes grupos de bactérias que atuam na completa ausência de oxigênio basicamente através de duas reações (PORTAL DO BIOGÁS, 2021a). Na primeira reação, ocorre a geração de metano e gás carbônico, a partir do ácido acético (PARKIN e OWEN, 1986).



Na segunda reação, parte do hidrogênio e gás carbônico geram metano e água (PARKIN; OWEN, 1986).



Nessa etapa, cerca de 70% do metano produzido é proveniente da decomposição do ácido acético. Somado a isso, é importante salientar que a água gerada no processo deve ser removida para que o ganho energético seja maximizado, pois durante a queima do gás ela

absorve parte do calor fornecido ao meio, superaquecendo e diminuindo a eficiência do procedimento (PARKIN e OWEN, 1986).

De modo geral, fatores como temperatura, pH e concentração de oxigênio também devem ser regulados para que todo o processo ocorra de modo eficiente. As quatro etapas apresentadas ocorrem de forma paralela e envolvem grupos de microrganismos variados, de modo que cada um deles possui exigências diferentes para a sua atuação. Assim, condições intermediárias devem ser analisadas e definidas para que o equilíbrio das populações de microrganismos seja mantido e a operação do processo seja bem-sucedida. Nesse contexto, os microrganismos metanogênicos apresentam maior sensibilidade às particularidades do meio e, portanto, exigem que os parâmetros sejam definidos em faixas que possibilitem sua atuação (PARKIN e OWEN, 1986).

É válido ressaltar que alguns pesquisadores defendem a separação do processo em dois estágios (reatores), o primeiro envolvendo a hidrólise e geração de ácidos, e o segundo a metanogênese, dessa forma seria possível a otimização das condições para cada etapa da digestão (CCE, 2020).

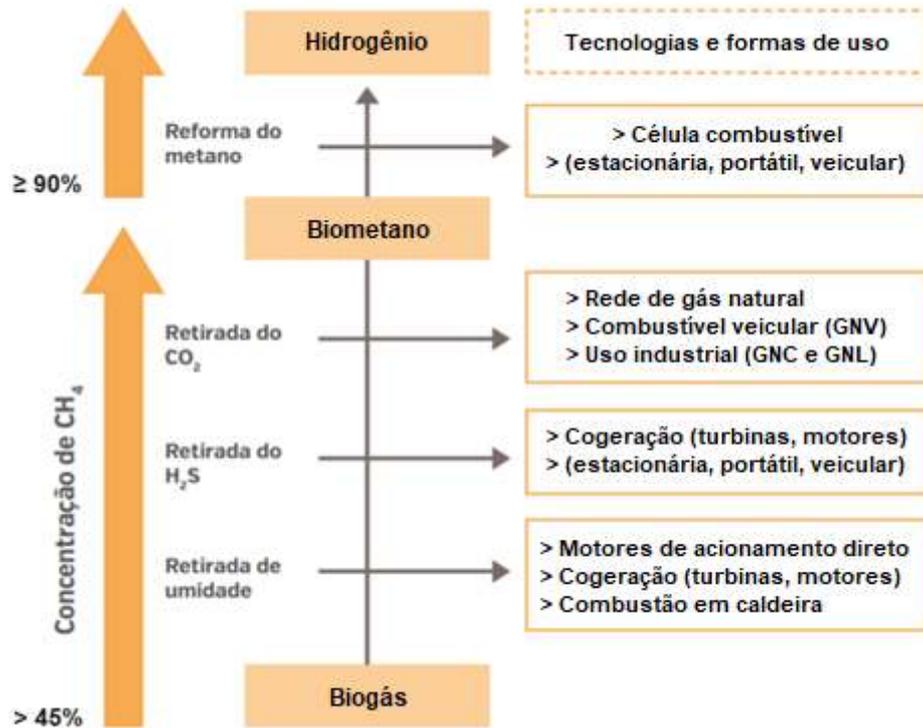
### **2.3.3 Utilidade**

Em várias das aplicações nas quais o gás natural é utilizado, é possível substituí-lo pelo biogás. No entanto, para alguns casos, é necessária a realização de tratamentos para cumprir com as especificações de qualidade estipuladas (ZANETTE, 2009).

A utilização final do biogás depende, principalmente, da concentração dos gases que o compõem. Quando enviado para a queima, o metano presente no gás entra em combustão gerando energia, de modo que ele se torna o componente com maior valor agregado. Dessa forma, quanto maior a concentração de metano, maior o valor econômico associado ao biogás (PORTAL DO BIOGÁS, 2021b). Nesse cenário, de acordo com a resolução 685 de 2017 da ANP, gases que apresentam concentrações de CH<sub>4</sub> iguais ou superiores a 90% passam a ser considerados como biometano.

Na Figura 2.9 estão dispostas algumas formas de uso do biogás de acordo com a concentração de metano em sua composição.

FIGURA 2.9 - Formas de uso comercial do biogás.



Fonte: Adaptado de BTE; IFEU; ISA (2004) apud JENDE et al (2015).

O biogás é comumente utilizado para geração de energia elétrica ou co-geração e para o aquecimento em processos. Além disso, também pode ser empregado como combustível veicular (GNV) e injetado na rede de gás natural, desde que obedecendo às especificações para essas aplicações (ZANETTE, 2009).

Nesse contexto, existe a possibilidade de purificação do biogás, de modo que o mesmo pode ser transformado em biometano, atendendo às especificações de qualidade. Pelo processo de purificação é possível obter um gás com maior poder calorífico e não corrosivo, devido à ausência de  $\text{H}_2\text{S}$ , amônia e água. Dessa forma, é possível reduzir a utilização do gás natural, combustível fóssil proveniente de fontes não renováveis, substituindo-o pelo biometano (ZANETTE, 2009).

### 2.3.4 Tipos de resíduos utilizados como substrato

As três fontes de resíduos mais comumente empregadas para a produção de biogás no Brasil são: agropecuária, estações de tratamento de esgoto/aterros sanitários e indústrias. A relação de substratos utilizados pode ser observada na Tabela 2.1 (CIBIOGAS, 2020).

**TABELA 2.1** – Classificação, por substrato, das plantas de biogás com fins energéticos em operação no Brasil em 2019.

<b>Origem do Substrato</b>	<b>Quantidade de plantas</b>		<b>Volume de Biogás (Nm<sup>3</sup>/ano)</b>	
Agropecuária	416	80%	165.112.571	12%
Indústria	62	12%	153.858.569	12%
Resíduo Sólido Urbano e Estação de Tratamento de Esgoto	43	8%	1.026.527.529	76%
<b>Total</b>	<b>521</b>		<b>1.345.498.670</b>	

Fonte: Adaptado de CIBIOGAS (2020).

Das plantas de produção de biogás no Brasil, apenas 1% produz o biometano, como pode ser observado na Tabela 2.2.

**TABELA 2.2** – Classificação por aplicação energética do biogás das plantas em operação no Brasil em 2019.

<b>Principal aplicação energética do Biogás</b>	<b>Quantidade de plantas</b>		<b>Volume de Biogás (Nm<sup>3</sup>/ano)</b>	
Energia elétrica	439	84%	1.168.138.811	86%
Energia térmica	70	14%	132.094.572	10%
GNR/Biometano	6	1%	37.739.175	3%
Energia mecânica	6	1%	7.526.112	1%
<b>Total</b>	<b>521</b>		<b>1.345.498.670</b>	

Fonte: Adaptado de CIBIOGAS (2020).

Nesse cenário, a distribuição das plantas nacionais de produção de biometano como aplicação energética principal a partir de biogás é apresentada na Tabela 2.3.

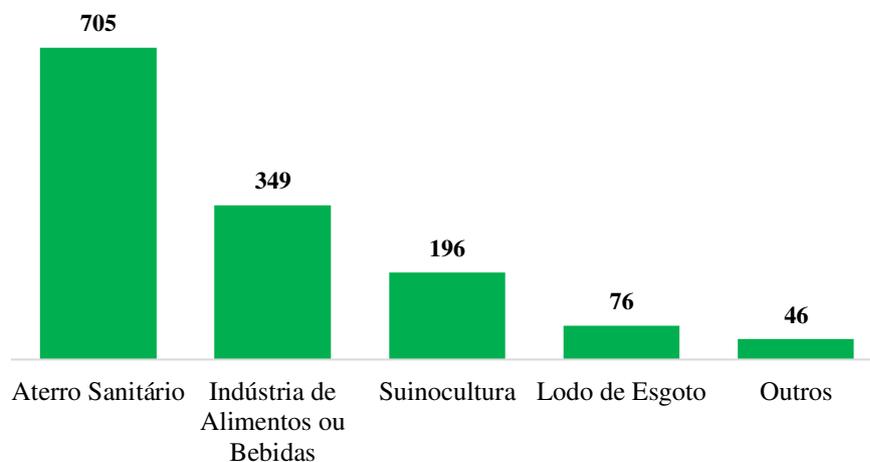
**TABELA 2.3** – Plantas de Biogás em operação em 2019 no Brasil que produzem biometano como aplicação energética principal.

<b>Município</b>	<b>Estado</b>	<b>Fonte de Substrato</b>	<b>Ano de Início da operação</b>
São Pedro da Aldeia	RJ	RSU	2015
Patos de Minas	MG	Agropecuária	2016
Foz do Iguaçu	PR	RSU	2017
Fortaleza	CE	RSU	2017
Concórdia	SC	Agropecuária	2018
Franca	SP	ETE	2018

Fonte: Adaptado de CIBIOGAS (2020).

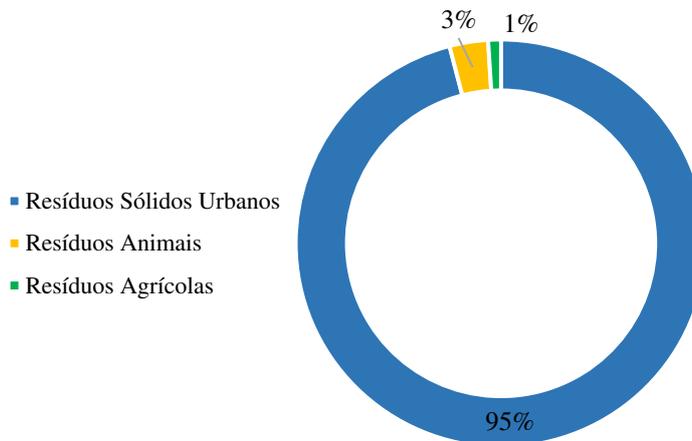
Além disso, é possível comparar também a produção média de biogás por substrato com a potência instalada de biogás por substrato em 2016 (em um total de 119 MW), conforme mostram as Figuras 2.10 e 2.11, respectivamente.

**FIGURA 2.10** - Produção média de biogás por substrato (mil Nm<sup>3</sup>/dia).



Fonte: Adaptado de CIBIOGAS apud COELHO (2017).

**FIGURA 2.11** – Potência instalada de biogás por substrato no Brasil em 2016.



Fonte: Adaptado de EPE; ANEEL apud COELHO (2017).

A partir das Figuras 2.10 e 2.11, pode-se observar que 51% da produção de biogás é proveniente da utilização de substratos de aterros sanitários e a potência instalada de resíduos sólidos urbanos é de 95%, o que evidencia o potencial energético do biogás, sobretudo, do que é produzido em aterros sanitários (EPE; ANEEL apud COELHO, 2017).

Dessa forma, é possível perceber que o Brasil possui um grande potencial para a produção do biogás, contando tanto com o setor agropecuário quanto com o de rejeitos urbanos. Aproveitar essa fonte de energia torna-se, portanto, uma solução inteligente e sustentável no que diz respeito à ampliação da matriz energética brasileira (EPE; ANEEL apud COELHO, 2017).

No setor de rejeitos urbanos, essa solução é ainda mais eficiente, visto que os aterros sanitários já existem e precisam apenas ser adaptados ao processamento do biogás produzido e otimizados para melhor aproveitamento de seus subprodutos (ICLEI, 2009). Desse modo, além de reutilizar rejeitos que outrora seriam descartados levando ao aumento da poluição do meio ambiente, ao empregar o biogás contribui-se para o estabelecimento de um planeta mais sustentável, com energias limpas e renováveis; promove-se o desenvolvimento de cidades e comunidades, tornando-as mais seguras, resilientes e sustentáveis; e contribui-se para o controle das ações climáticas, assim como propõe os ODS da ONU.

Somado a isso, a utilização de resíduos orgânicos para a produção de biogás com finalidade de geração de energia elétrica, antes desperdiçados em aterros sanitários e lixões, estar-se-ia tornando o ciclo do carbono mais limpo e sustentável. Utilizando-se da degradação desse tipo de biomassa, estaríamos reutilizando uma fonte de carbono já presente no ambiente

e o gás carbônico liberado após a sua queima seria, posteriormente, fixado por plantas através da fotossíntese, podendo estas serem usadas como biomassa para a nova produção de biogás (ou para outro fim). Dessa forma, ao invés de liberar mais carbono na forma de CO<sub>2</sub> na atmosfera - um dos causadores do aquecimento global - estaríamos o recapturando (SILVA, 2009).

## 2.4 ATERRO SANITÁRIO

De acordo com a ABNT NBR 15849 de 2010, o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos (RSU) é estabelecido como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

De acordo com a mesma normativa, os aterros sanitários devem apresentar vida útil superior a 15 anos e supervisão por mais 10 anos, no mínimo, após o encerramento de suas atividades, garantindo assim a segurança e qualidade do empreendimento.

A mesma norma define o RSU como:

Resíduos que, em conformidade com o estabelecido na Resolução CONAMA no 404/2008, sejam provenientes de domicílios, serviços de limpeza urbana, pequenos estabelecimentos comerciais, industriais e de prestação de serviços, que estejam incluídos no serviço de coleta regular de resíduos e, que tenham características similares aos resíduos sólidos domiciliares.

Nesse contexto, os RSUs podem apresentar composições diversas, variando de acordo com a população, condições socioeconômicas e hábitos pessoais (MPGO, 2021). É possível que sejam classificados como matéria orgânica, papel, vidros, plásticos, metais e outros.

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, publicado em 2021 pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), cada brasileiro aumentou sua produção de lixo em 2020, resultando no valor de cerca de 390,55 kg de resíduo por ano. Além disso, no relatório do panorama anterior, publicado no ano de 2017, foi feito um levantamento sobre o tipo de disposição final adotada para os RSUs, deixando evidente que a utilização de aterros sanitários se encontra bem difundida em todo o território nacional, conforme a Tabela 2.4.

**TABELA 2.4** – Quantidade de municípios brasileiros por tipo de destinação final dos RSUs em 2017.

Disposição Final	Brasil 2016	2017 - Regiões e Brasil					Brasil
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	
Aterro Sanitário	2239	90	449	159	817	703	<b>2218</b>
Aterro Controlado	1772	108	484	159	634	357	<b>1742</b>
Lixão	1559	252	861	149	217	131	<b>1610</b>
<b>Brasil</b>	<b>5570</b>	<b>450</b>	<b>1794</b>	<b>467</b>	<b>1668</b>	<b>1191</b>	<b>5570</b>

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2017).

No Brasil, localiza-se o terceiro maior aterro sanitário do mundo, o UVS Caieiras (Essencis), localizado na cidade de Caieiras no estado de São Paulo, ocupando uma área de cerca de 3,5 milhões de metros quadrados e operando desde meados de 2002. A unidade tem capacidade de receber cerca de 10,6 mil toneladas de resíduos sólidos industriais e urbanos por dia. Ela conta com uma termelétrica que utiliza o metano, proveniente do biogás gerado no aterro, para a produção média de 230 mil MWh ao ano (MDR, 2021).

Num contexto geral, o aterro sanitário está sendo muito utilizado pelas grandes cidades como destino dos RSUs, por se tratar de um método mais seguro e eficaz quando comparado aos lixões e aterros controlados (VILANOVA NETA, 2011).

Sua estrutura é dividida em três grandes setores: o de preparação, o de execução e o concluído. Os aterros sanitários de grande porte desenvolvem esses setores concomitantes em várias áreas, já os de menor porte desenvolvem cada setor de cada vez (REIS, 2001).

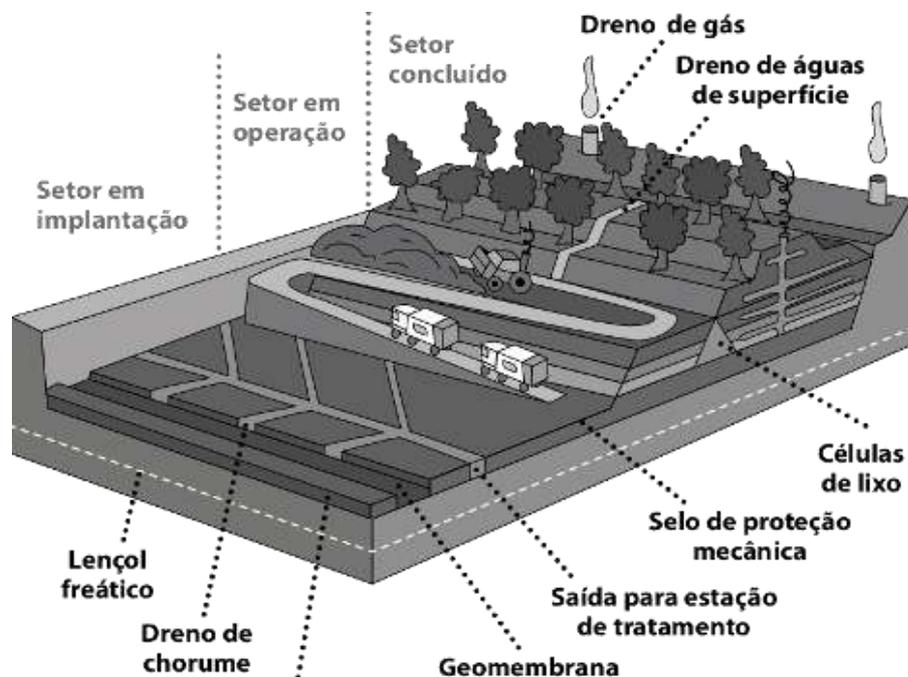
Na primeira etapa, no setor de preparação da área, são realizados a impermeabilização ou instalação de uma manta de polietileno de alta densidade (PEAD), para evitar a contaminação de lençóis freáticos, além do nivelamento do terreno, obras de drenagem para captação do chorume e construção das vias de circulação. Para evitar ou diminuir a proliferação de odores e a poluição visual, os aterros devem ser delimitados por uma cerca viva, de acordo com a norma vigente (REIS, 2001).

Na etapa seguinte, a de execução, os RSUs são separados de acordo com suas características e depositados separadamente. Os resíduos que produzem chorume são revestidos

por uma camada selante. Atingida a capacidade de disposição de resíduos em um setor do aterro, ele é recoberto com uma vegetação, com os resíduos sendo então depositados em um novo setor. Ao longo da disposição e mesmo após a conclusão de um setor do aterro, o chorume deve ser recolhido para tratamento, o biogás produzido pela decomposição dos RSUs deve ser captado para futuro aprimoramento e seu excesso deve ser queimado nos *flares*, evitando um aumento de pressão alarmante e possível explosão (REIS, 2001).

Os setores concluídos devem ser permanentemente monitorados para evitar a poluição do solo e de aquíferos, realizando-se avaliações das obras de captação de chorume e do sistema de queima dos gases. A Figura 2.12 apresenta um esquema de aterro sanitário e seus setores.

**FIGURA 2.12** – Esquema representativo de um aterro sanitário.



Fonte: Retirado de AMBIENTAL apud PALERMO e GOMES (2017).

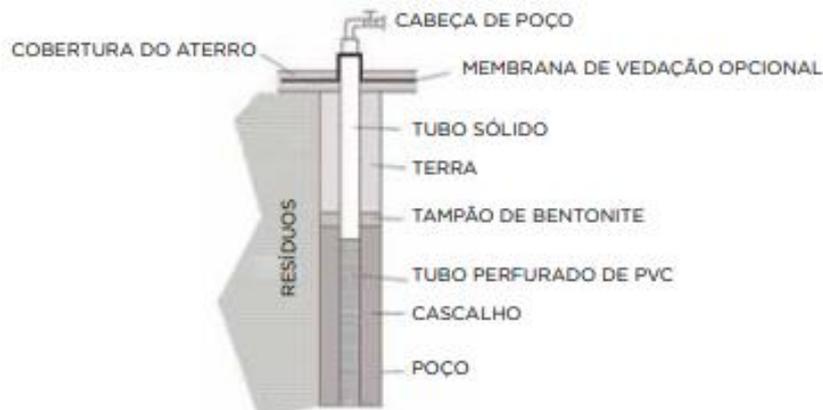
A decomposição da matéria orgânica presente nos RSUs depositados ocorre em duas etapas: a decomposição aeróbia, no período de deposição do resíduo e, posteriormente, a decomposição anaeróbica, através da redução do  $\text{CO}_2$  gerado pelos resíduos (PIÑAS et al, 2016).

Um aterro de resíduos sólidos urbanos pode ser visto como um reator biológico, onde a corrente de entrada (reagentes) é composta pelos resíduos orgânicos e água e a corrente de saída (produtos) é constituída pelos gases e o chorume (PIÑAS et al, 2016).

Existem duas formas de realizar a coleta do biogás gerado pelo aterro sanitário, através de drenos verticais, também chamados de poços verticais, demonstrado na Figura 2.13, ou

drenos horizontais, demonstrados na Figura 2.14. Na coleta horizontal os drenos sofrem uma maior pressão, adicionando-se um desafio à finalização do projeto quando comparado à aplicação dos drenos verticais. Ambos os sistemas, se implementados adequadamente, são igualmente eficientes na coleta do biogás, embora o sistema vertical seja mais comum (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

**FIGURA 2.13** – Esquema de um poço vertical.



Fonte: Retirado de EPA (2010) apud TAVARES; SANTOS; CARVALHO (2019).

**FIGURA 2.14** – Esquema de um dreno horizontal.



Fonte: Retirado de EPA (2010) apud TAVARES; SANTOS; CARVALHO (2019).

O espaço entre os drenos e a parede da tubulação é preenchido com cascalho. O topo da abertura do dreno é parcialmente coberto por argila e a área ao redor coberta por uma geomembrana (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Além dos drenos, sopradores, compressores, filtros para a remoção de material particulado e tanques separadores de condensado são instrumentos indispensáveis para a captação do biogás. A sua extração é realizada pela sucção dos compressores, aos quais a linha principal está interligada (ICLEI, 2009; TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Segundo a organização internacional ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, as tubulações dos drenos e poços são interligadas a *manifolds* ou pontos de regularização de

fluxo (PRs) e estes são interligados a uma tubulação principal, que conduz o biogás para os sistemas de tratamento e purificação ou para os *flares*, neste último caso como forma de alívio da pressão interna. Cada *manifold* receberá um fluxo de gás originado nos poços e drenos mais próximos.

Do ponto de vista de controle e instrumentação, na tubulação principal o fluxo do biogás é controlado diretamente por uma válvula borboleta e indiretamente por um inversor de frequência acoplado ao motor do soprador, acionado através de um transmissor de pressão, localizado na linha de sucção. Dessa forma, a vazão do processo se mantém constante. Além disso, na mesma linha de sucção é acoplado um termômetro para monitorar localmente a temperatura do gás no interior da tubulação (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

O biogás gerado e recolhido nos aterros sanitários tem composição variável. A finalidade de seu tratamento é reduzir os efeitos de compostos contaminantes, indesejáveis, corrosivos e prejudiciais aos equipamentos e tubulações, além de o purificar, promovendo assim uma alta eficiência operacional e o aumento de seu poder calorífico (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

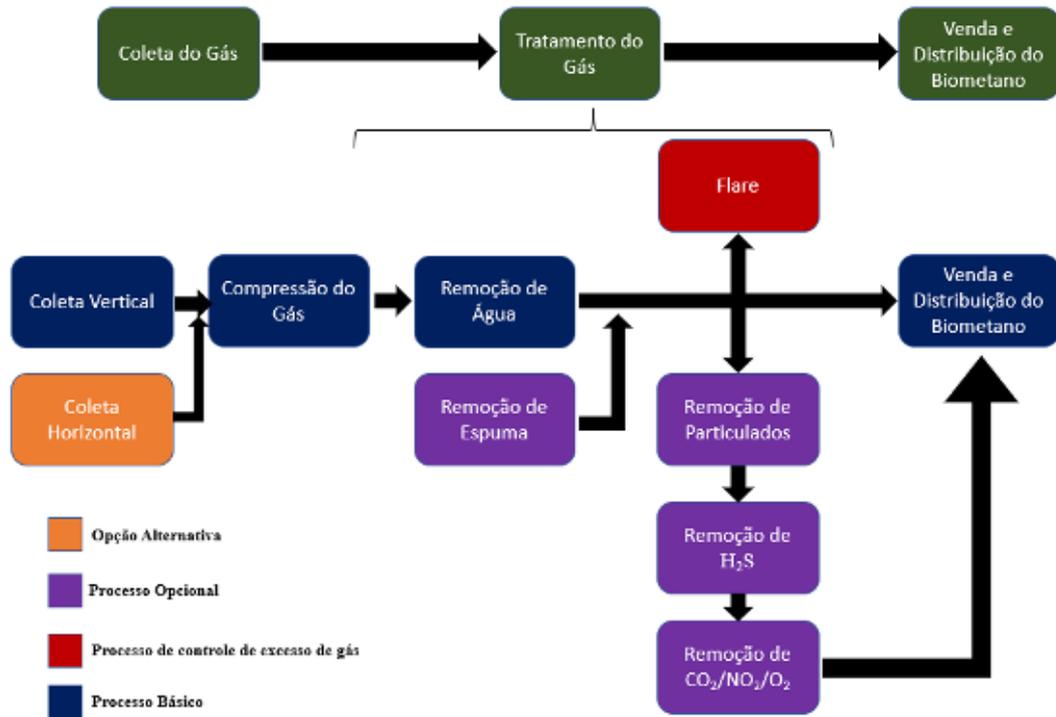
## 2.5 TRATAMENTO DO BIOGÁS

O tratamento do biogás geralmente envolve duas grandes etapas, sendo a primeira usada para remover particulados, água e vapores de água e a segunda para retirar compostos químicos, de acordo com a finalidade do gás (queima direta, produção de gás natural veicular, refinamento para biometano, etc) (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

De maneira geral, a segunda etapa procura remover impurezas, principalmente compostos como o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) ou siloxanos, e retirar o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), fazendo com que o gás resultante tenha um poder calorífico maior, sendo assim mais interessante do ponto de vista energético e comercial (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

A Figura 2.15 representa a cadeia de valor do biogás, descrevendo as etapas de tratamento até seu refinamento ao biometano e produção de energia elétrica associada à sua queima.

FIGURA 2.15 – Cadeia de Valor do Biogás.



Fonte: Adaptado de TAVARES; SANTOS; CARVALHO (2019).

Após o tratamento, o biometano é então distribuído e armazenado de acordo com sua futura utilização. Porém, independentemente da aplicação energética escolhida para o gás, recomenda-se a instalação de um *flare*, por segurança. Em caso de qualquer tipo de falha, seja no sistema de geração de energia ou outro tipo de aproveitamento, evita-se a emissão de metano para a atmosfera e uma possível explosão. O *flare* também é acionado em momentos de manutenção da planta (ICLEI, 2009).

### 2.5.1 Remoção de material particulado

A primeira etapa de tratamento é realizada pela passagem do biogás, coletado pela linha central, através de um filtro, com a finalidade de remover todo e qualquer material particulado eventualmente arrastado junto com o gás. São instalados na tubulação, antes e depois do filtro, medidores de pressão para monitorar o aumento da perda de carga, permitindo assim identificar o momento de troca do elemento filtrante (ICLEI, 2009).

### 2.5.2 Desumidificação

Em seguida, a corrente segue para o processo de desumidificação, no tanque separador de líquidos. O vapor de água presente no biogás ao ser transportado em tubulações, superfícies mais frias quando comparadas ao meio reacional em que o gás foi produzido, pode condensar e assim bloquear sua canalização, reduzindo-se a pressão. Além disso, a presença de umidade altera características intrínsecas do gás, como seu poder calorífico e limite de inflamabilidade, fatores importantes quando tratamos de questões energéticas (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Dessa forma, é colocado próximo ao compressor de gás um tambor para a retirada de água. Esse equipamento reduz a velocidade do gás de forma que o líquido “caia” por gravidade e seja recuperado por um dreno. O tambor tem capacidade de tratar até 10 mil m<sup>3</sup>/h de biogás, removendo cerca de um litro de água por minuto (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Se houver a presença de espuma, é feita a instalação de malhas metálicas nos canos que entram e saem do tambor de condensado, chamadas de *demister*. Essas malhas levam ao colapso da espuma presente na corrente de biogás, por meio da coalescência das partículas de água e drenagem por gravidade. Dependendo da finalidade do gás produzido, pode-se aumentar ainda mais a taxa de remoção de água utilizando ciclones de separação gás-líquido (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Outra forma de desumidificação seria através da secagem por absorção. Por esse método, o biogás escoar por uma coluna absorvedora em contracorrente com uma solução de trietilenoglicol ou glicol, que absorve a umidade da corrente gasosa. Essa técnica é considerada de alto investimento e indicada apenas para fluxos de gás mais elevados, de até 500 m<sup>3</sup>/h (AMARAL, 2019).

### 2.5.3 Dessulfurização

No caso do sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), a importância de sua remoção se deve ao fato do mesmo possuir alto potencial corrosivo, danificando os equipamentos e tubulações, além de sua alta toxicidade, podendo levar à asfixia e até mesmo à morte em casos de exposições prolongadas em concentrações a partir de 350 ppm (KRONOS, 2014).

Além disso, quando o biogás contendo  $\text{H}_2\text{S}$  sofre combustão, óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) podem ser formados, causando poluição atmosférica e danos em equipamentos utilizados para a queima (MIAO *et al.*, 2018).

Nesse contexto, existem 3 principais técnicas de tratamento pós-biodigestão que podem ser utilizadas: absorção, adsorção e tratamento biológico (FREDDO e MARTINEZ, 2019).

A técnica que utiliza o princípio de absorção pode considerar a absorção física ou química. A lavagem do gás com água, também chamado de *water scrubbing*, é um dos processos que utilizam a técnica de absorção física para remover não só o  $\text{H}_2\text{S}$ , como também o  $\text{CO}_2$  presentes no gás. Isso ocorre pois o sulfeto de hidrogênio e o dióxido de carbono possuem solubilidade em água maior que a do metano, de modo que é possível separá-los (FREDDO e MARTINEZ, 2019).

Outro processo, que utiliza a técnica de absorção química, é o do ferro quelado. Nele, o  $\text{H}_2\text{S}$  presente no biogás é dissolvido em meio líquido, a solução deve ter o seu pH controlado para que o meio fique neutro ou básico e o  $\text{H}_2\text{S}$  aquoso se dissocie em  $\text{S}^{2-}$  e reaja com Fe/EDTA (quelato de ferro) para formar enxofre insolúvel, que pode ser facilmente recuperado por filtração ou sedimentação. O quelato de ferro é reduzido e, posteriormente, pode ser regenerado a partir da introdução de oxigênio no sistema para que haja oxidação (HORIKAWA *et al.*, 2004; FRARE *et al.*, 2010).

Esse processo é muito vantajoso por inúmeros motivos. Dentre eles estão a operação em temperatura e pressão ambiente, o baixo consumo de reagentes em função da capacidade de regeneração da solução, a remoção seletiva de  $\text{H}_2\text{S}$ , a alta eficiência na remoção e ainda a produção de enxofre elementar que pode ser comercializado (HORIKAWA *et al.*, 2004; FRARE *et al.*, 2010).

Um terceiro processo, e um dos mais antigos, que utiliza a técnica de absorção para remover o  $\text{H}_2\text{S}$  do biogás é o de utilização de soluções cáusticas. Nele, o biogás passa por uma coluna de absorção em contracorrente com a solução cáustica utilizada (geralmente, hidróxido de sódio). Esse processo, além de remover o  $\text{H}_2\text{S}$ , também pode remover parte do  $\text{CO}_2$ . (FREDDO e MARTINEZ, 2019).

Um grande controle se faz necessário nesse caso, de modo que é exigida a utilização de mão de obra especializada. Assim, sua aplicação deve ser considerada quando se tem uma alta concentração de  $\text{H}_2\text{S}$  no biogás e uma grande flutuação de concentração. Dessa forma, torna-se

economicamente viável para unidades produtoras de grande porte, em especial para unidades que visam à produção de biometano (VUT, 2012).

Existe além da absorção a técnica que utiliza o princípio de adsorção, que ocorre quando as moléculas de  $H_2S$  aderem através de forças intermoleculares em um sólido (adsorvente) com alta área superficial. Assim como na absorção, existe também a adsorção física, em que as moléculas ficam aderidas nos poros dos adsorventes por forças de atração física relativamente fracas, e a química, na qual estão presentes forças de ligação química fortes. Além disso, o adsorvente quando saturado pode ser descartado ou regenerado (ALLEGUE e HINGE, 2014).

Para a técnica que utiliza o princípio de adsorção, existem os processos do carvão ativado e dos *pellets* de óxido ou hidróxido de ferro. O carvão ativado é um dos adsorventes mais utilizados e eficiente para remoção do  $H_2S$ . Isso porque, além da adsorção física, ele fornece uma superfície catalítica para oxidação em enxofre elementar e sulfato, o que aumenta a capacidade de remoção de  $H_2S$  (ALLEGUE e HINGE, 2014).

O carvão ativado pode ainda ser impregnado por compostos alcalinos ou óxidos, como o iodeto de potássio, hidróxido de sódio, carbonato de sódio, entre outros, para aumentar a remoção de  $H_2S$  em, aproximadamente, 86% (ALLEGUE e HINGE, 2014). É importante destacar que, para esse processo, os particulados e a umidade do biogás devem ser removidos previamente, além disso, não é possível a regeneração do carvão impregnado (FREDDO e MARTINEZ, 2019).

Outro procedimento que utiliza a técnica de adsorção é o de *pellets* impregnados com óxido ou hidróxido de ferro. Nele, o sulfeto de hidrogênio presente no biogás pode reagir com óxido de ferro, hidróxido ou óxido de zinco e formar sulfeto de ferro ou sulfeto de zinco, respectivamente. Para isso, aplicam-se *pellets* com esses reagentes no leito do reator utilizado para a passagem do biogás. (RyckeBosch; Drouillon; Vervaeren, 2011).

Por fim, outra técnica que pode ser utilizada para remoção do  $H_2S$  presente no biogás é o tratamento biológico, considerado eficaz, confiável, ecológico e econômico. Para isso, utiliza-se um filtro biológico com bactérias responsáveis por realizar a oxidação do sulfeto de hidrogênio (PETERSSON, 2013 apud FREDDO e MARTINEZ, 2019).

Para garantir o bom funcionamento do processo, é preciso controlar parâmetros como temperatura, pH, umidade e os nutrientes disponíveis (RATTANAPAN e OUNSAHEHA, 2012).

A Tabela 2.5 traz as vantagens e desvantagens de cada técnica para dessulfurização do biogás.

**TABELA 2.5** – Vantagens e desvantagens das tecnologias de dessulfurização de biogás.

<b>Tecnologia</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Absorção em água	⇒ Remoção simultânea de H <sub>2</sub> S e CO <sub>2</sub> . ⇒ Alta eficiência na remoção de H <sub>2</sub> S. ⇒ Tecnologia robusta e amplamente difundida. ⇒ Baixo custo	⇒ Recomendável apenas para aplicação em concentrações inferiores a 500 ppm de H <sub>2</sub> S. ⇒ Sua viabilidade fica condicionada à remoção simultânea de CO <sub>2</sub> . ⇒ Possibilidade de formação de ácido sulfúrico e dióxido de enxofre.
Solução de quelato de ferro	⇒ Conversão de um poluente em um produto químico que pode ser comercializado. ⇒ Alta eficiência na remoção de H <sub>2</sub> S operando em pressão e temperatura ambiente. ⇒ Baixo custo, porém maior do que o do método de absorção em água. ⇒ Regenerável.	⇒ Dificuldade em separar as partículas em suspensão na coluna de absorção (em sistemas de grande porte).
Solução cáustica	⇒ Alta eficiência na remoção de H <sub>2</sub> S. ⇒ Suporta grandes variações de concentração de H <sub>2</sub> S.	⇒ Alto custo de operação. ⇒ Disposição de grandes volumes de água contaminada com sulfeto de sódio que precisam ser tratadas. ⇒ Dificuldades para lidar com a consistência e propriedades da solução. ⇒ Não regenerável.

**TABELA 2.5** – Vantagens e desvantagens das tecnologias de dessulfurização de biogás (continuação).

<b>Tecnologia</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Adsorção em carvão ativado	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Alta eficiência.</li> <li>⇒ Baixo requisito de temperatura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Alto custo de investimento e operação.</li> <li>⇒ Podem ocorrer perdas de metano.</li> <li>⇒ Adsorvente geralmente não é regenerado.</li> </ul>
Adsorção em <i>pellets</i> de óxidos/hidróxidos de ferro	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Custo de implantação relativamente baixo.</li> <li>⇒ Processo simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Os custos de operação podem ser altos (dependendo do adsorvente utilizado).</li> <li>⇒ A regeneração é exotérmica (risco de ignição).</li> <li>⇒ A capacidade de adsorção é reduzida a cada ciclo de regeneração.</li> </ul>
Filtro biológico	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Alta capacidade de remoção de H<sub>2</sub>S: &gt; 97%.</li> <li>⇒ Baixos custos operacionais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Remanescente de ar no biogás.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de FREDDO e MARTINEZ (2019).

#### **2.5.4 Adsorção por variação de pressão**

Os equipamentos de adsorção por variação de pressão (*Pressure Swing Adsorption* – PSA) se baseiam no fato de que sob alta pressão os gases são atraídos a superfícies sólidas, levando em conta suas características moleculares e capacidade de serem captadas pelos materiais adsorventes. Os principais materiais utilizados são o carvão ativado, a sílica gel ou a alumina (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Posteriormente com a pressão sendo reduzida, o gás composto pelos elementos indesejados é solto pela dessorção. De acordo com a finalidade do biogás e, conseqüentemente,

seu nível de pureza desejado, o processo envolve diversos tanques sequenciais com níveis de pressão diferentes (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Durante o processo de adsorção, o biogás é injetado pela base das colunas. Os gases capturados, como o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), gás nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ), passam pelo processo de variação de pressão liberando-se do elemento adsorvente, que pode ser reutilizado, e são posteriormente tratados em uma nova corrente (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Além do alto enriquecimento do biogás, chegando a concentrações superiores a 90% de metano (XEBEC, 2010 apud TAVARES *et al.*, 2019), o processo não exige o uso de produtos químicos, requer pouca potência e consegue remover uma grande quantidade de gases de uma única vez. Sua desvantagem consta na necessidade de retirada prévia do  $\text{H}_2\text{S}$ , pois o mesmo permanece fortemente adsorvido, impossibilitando a reutilização do material adsorvente escolhido (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

### **2.5.5 Separação por membranas**

O processo de separação por membranas se baseia na diferença de tamanho entre as moléculas existentes no gás e ocorre devido à diferença de potencial químico, decorrente do gradiente de pressão aplicado entre os lados de uma membrana densa. Essas membranas devem ser resistentes em caso de operação em condições não ideais, como temperaturas acima de 50 °C e pressões elevadas (RUZZA, 2019).

Essa técnica apresenta elevada seletividade para a remoção do  $\text{CO}_2$ , além de poder ser utilizada para eliminação de vapor d'água, oxigênio, hidrogênio, entre outros. A taxa de remoção depende do tamanho das moléculas, do tipo de membrana utilizada (no caso do biogás, pode-se utilizar membranas de polímero vítreo ou carbono) e da hidrofiliabilidade (BAKER, 2004 apud BAUER *et al.*, 2013).

### **2.5.6 Criogenia**

A criogenia se baseia no fato de que os gases que compõem o biogás possuem diferentes pontos de congelamento. O processo ocorre a temperaturas próximas de -100 °C e em altas

pressões. Para atingir essas condições extremas, uma série de compressores e resfriadores é instalada na planta de tratamento do biogás (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

As vantagens desta tecnologia são sua escalabilidade, a ausência de resíduos químicos e a pureza do gás resultante, com concentrações de metano superiores a 99 % em volume (BORSCHIVER e SILVA, 2014). Trata-se, contudo, de uma tecnologia que apresenta custo elevado, requerendo considerável investimento em sua instalação e manutenção, além de possuir alto gasto energético (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

Nesse contexto, existem 3 principais sistemas criogênicos, o de liquefação *flash*, de destilação e liquefação combinado com a dessublimação. O primeiro processo geralmente é realizado em dois estágios e pode ser utilizado para a remoção de água e dióxido de carbono presentes no biogás. De modo geral, o biogás é comprimido e resfriado para que, em seguida, seja enviado a um vaso *flash*, onde ocorre a retirada da fase líquida composta majoritariamente por CO<sub>2</sub>. A água é removida no início do sistema através da utilização de um tambor de separação (TAN *et al.*, 2017).

Esse processo emprega diversos trocadores, mas a etapa elementar é realizada nos trocadores de calor criogênicos principais, comumente são utilizados trocadores de placas de alumínio ou trocadores em tubo espiral. O resfriamento é proporcionado por uma mistura de diferentes fluidos refrigerantes que pode ser constituída por gás nitrogênio e hidrocarbonetos leves, por exemplo (BEGAZO, 2008).

Já no sistema de destilação, o gás desidratado é comprimido, resfriado e enviado para a coluna. Parte do produto de topo é retirado na fase vapor enquanto outra parcela é condensada e retorna para o interior da coluna, esse arrefecimento é proporcionado por um ciclo de resfriamento externo. No caso do biogás, o metano é recolhido na parte superior da torre e o dióxido de carbono liquefeito é obtido no fundo (TAN *et al.*, 2017).

De modo semelhante, o processo de liquefação combinado com a dessublimação é iniciado com a compressão e o resfriamento do gás seco, em seguida o CO<sub>2</sub> é removido em um separador. O dióxido de carbono é recolhido e processado visando a recuperação de metano, posteriormente, o gás é resfriado e expandido para a obtenção de CO<sub>2</sub> sólido. Esse sistema resulta em elevada pureza quando aplicado ao tratamento do biogás, de modo que o produto final pode atingir valores de composição acima de 97% de metano, contudo se trata de uma tecnologia que ainda exige pesquisas no que diz respeito à otimização (TAN *et al.*, 2017).

## 2.6 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS NA PRODUÇÃO DE BIOMETANO

Além de apresentar as aplicações de geração energética citadas anteriormente, o biogás também pode ser utilizado de forma complementar ao gás natural. Para isso, é necessário transformá-lo em biometano e injetá-lo na rede de distribuição (*grid*) já existente. Segundo a norma nº 685 de 2017 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o biometano é o combustível gasoso constituído essencialmente de CH<sub>4</sub>, com concentração mínima de 90% molar, sendo derivado da purificação do biogás.

Outra possibilidade de aplicação se dá ao purificar o biogás para utilizá-lo como combustível veicular (GNV). O biometano pode ser empregado da mesma forma que o gás natural, de modo que pode ser utilizado em veículos convencionais movidos a GNV (BECHER, 2016). O mesmo pode ser disponibilizado na forma gasosa (GNC) ou líquida (GNL), sendo cada vez mais utilizado nos transportes como alternativa aos combustíveis convencionais (DOUROGÁS GNV, 2021).

A obtenção de biometano pode trazer muitas vantagens, como a redução das emissões de CO<sub>2</sub> de veículos movidos a gás, redução dos problemas de qualidade do ar, utilização de um método eficiente para o tratamento biológico de resíduos, aprimoramento do rendimento de combustíveis, entre outros (BECHER, 2016).

No entanto, para que as aplicações apontadas possam ser utilizadas, inúmeros critérios especificados pela ANP devem ser atendidos. As aplicações referenciadas acima envolvem padrões de qualidade estabelecidos pelas Resoluções ANP nº 8/2015 e ANP nº 685/2017 (POBLETE, 2019).

A primeira envolve a produção de biogás a partir de resíduo agroindustrial, enquanto a segunda é referente ao biogás gerado a partir de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (ETE).

Dentre as especificações que o biometano deve contemplar, encontram-se as normas relativas ao poder calorífico, índice de Wobbe, e concentração de compostos como o gás sulfídrico, dióxido de carbono, oxigênio, etano, propano, butanos e outras substâncias mais pesadas. Além disso, para ser utilizado em substituição/complementaridade ao gás natural, ele deve ser pressurizado entre 100 e 500 psig (ANP, 2018 apud POBLETE, 2019).

Após a produção do biometano na planta geradora, é possível realizar o fornecimento e transporte desse combustível de 3 maneiras. A primeira é alimentando e armazenando o biometano na rede de gás natural, conforme as disposições legais, para que depois possa ser distribuído em postos de abastecimento ou em indústrias conectadas na rede de gás natural. A segunda maneira ocorre diretamente nos postos de abastecimento, em que o biometano é disponibilizado como biometano comprimido (BMC) ou biometano liquefeito (BML) (BECHER, 2016).

Por fim, é possível realizar o engarrafamento do gás em cilindros e transportá-lo em caminhões até o local de consumo. As opções de fornecimento e de transporte devem ser consideradas antes mesmo da seleção do local em que a planta de biogás e o posto de abastecimento de biometano serão implantados (BECHER, 2016).

Cabe ressaltar que o BMC é comumente utilizado por ser, muitas vezes, mais vantajoso economicamente. Nesse caso, o biometano é comprimido a pressões acima de 20000 kPa e depois armazenado. Já o BML pode ser produzido através da refrigeração com o nitrogênio, por exemplo, a uma temperatura de aproximadamente  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$  (BECHER, 2016). O armazenamento é realizado posteriormente em acumuladores (tanques) de baixa pressão. Como a produção de biogás não é contínua e pode sofrer oscilações, é necessário analisar para cada processo a melhor forma de armazenamento (BECHER, 2016).

Além da possibilidade de armazenamento a baixas pressões, de acordo com o estudo de Hashemi *et al.* (2019), o BML também tem como vantagem a sua densidade energética de cerca de 21 MJ/L, aproximadamente 2,4 vezes maior do que a do BMC. Dessa forma, o interesse nesse combustível alternativo está ganhando notoriedade e será abordado nesse trabalho.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO**

Para a realização do estudo da planta de produção de biometano a partir de biogás, utilizou-se como base o artigo de Hashemi *et al.* (2019). No referido trabalho, são apresentadas duas plantas para a produção de biometano líquido: o primeiro caso fundamenta-se na técnica de criogenia; o segundo utiliza-se da técnica de absorção por aminas.

Os resultados obtidos pelos autores indicaram que o aprimoramento do biogás através da técnica de destilação criogênica se mostrou mais atrativa, visto que apresenta maior recuperação de metano e eficiência energética, quando considerado todo o processo de produção. Dessa forma, o presente trabalho foi fundamentado no processo criogênico apresentado e as simulações foram realizadas através do *software* Aspen Hysys® 2.2, cuja licença a Universidade Federal Fluminense possui.

Em seguida, são apresentadas as heurísticas e especificações utilizadas para as modificações dos sistemas de aquecimento e resfriamento pertinentes ao processo.

Por fim, o conceito de ecoeficiência é contextualizado, de modo que são apresentados indicadores para a composição da análise conforme o método de Índice Comparativo de Ecoeficiência (ICE) proposto por Pereira *et al.* (2014).

#### **3.1 PROCESSO PROPOSTO PELO ARTIGO BASE**

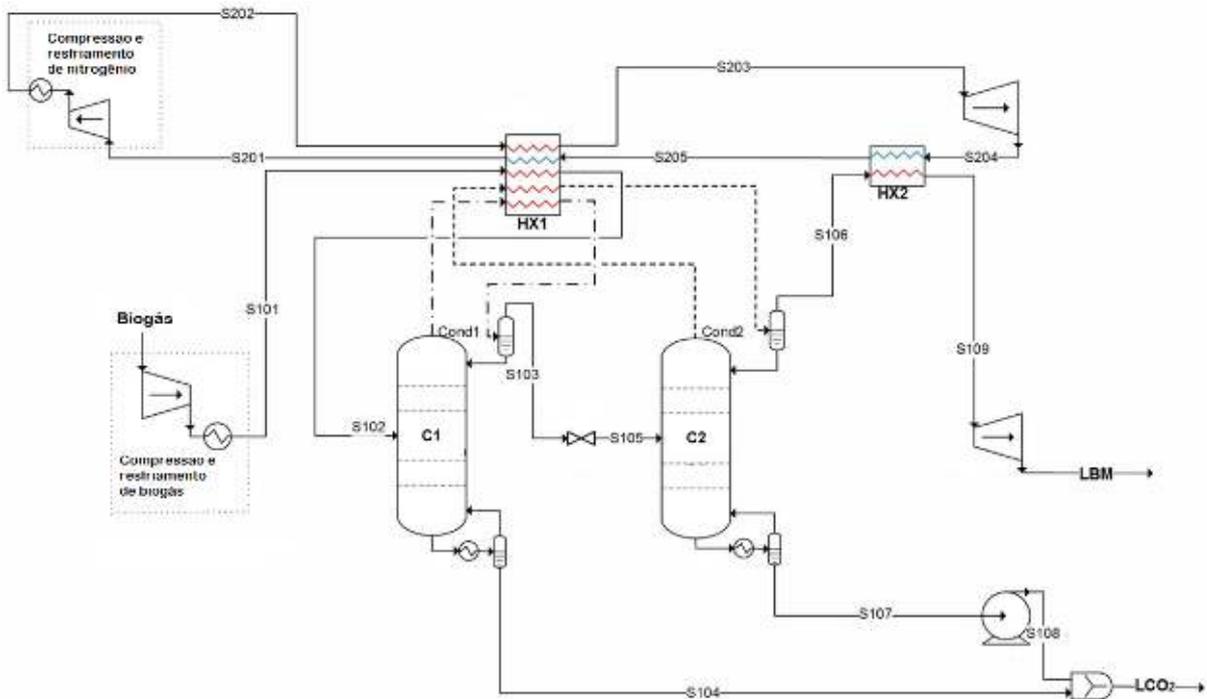
As simulações realizadas no presente trabalho consideram a planta do processo original, desenvolvida por Hashemi *et al.* (2019). Os autores utilizaram o *software* Aspen Hysys® 9.0 e o modelo termodinâmico baseado na equação de *Soave-Redlich-Kwong* (SRK).

A planta consiste em duas colunas de destilação criogênica operando em diferentes níveis de pressão com pratos de 100% de eficiência e refeedores que funcionam a base de água. Somado a isso, são utilizados expansores, bombas e compressores elétricos, todos com o valor padrão de 80,00 % de eficiência isentrópica. O resfriamento realizado no trocador de placas HX1 é proporcionado pelo ciclo de nitrogênio. As trocas efetuadas nesse equipamento envolvem o resfriamento da corrente de biogás comprimido, logo antes da entrada na primeira coluna, assim como as trocas realizadas nos condensadores de ambas as torres.

O trocador HX2 também é integrado ao ciclo com nitrogênio e responsável pela liquefação da corrente de biometano produzido. Por fim, foram desconsideradas as perdas de carga nas colunas de destilação e nos trocadores de calor utilizados para fins de simplificação.

A Figura 3.1 retrata o fluxograma do processo de produção de biometano apresentado no artigo. As especificações das correntes do processo e condições operacionais são apresentadas na mesma.

**FIGURA 3.1** – Fluxograma do processo de produção de biometano via destilação criogênica.



Fonte: Adaptado de Hashemi *et al.* (2019).

### 3.1.1 Seção de entrada

A planta é alimentada por uma corrente de biogás com vazão molar de 1000,00 kgmol/h na temperatura de 35 °C e pressão de 100 kPa, de modo que a corrente se encontra totalmente na forma de vapor. A composição molar do gás adotado pelo artigo é de 60% de metano, 39,90% de CO<sub>2</sub> e 0,10% de H<sub>2</sub>S.

### 3.1.2 Seção de compressão e resfriamento

A corrente de entrada, intitulada “Biogás”, passa por um processo de compressão para atingir a pressão de 5050 kPa, representado no artigo por um único compressor combinado com um trocador de calor responsável pelo resfriamento. Os autores utilizam um sistema de compressão de 4 estágios, de modo que os compressores são intercalados com resfriadores à base de água. Por fim, o biogás segue para o trocador de placas HX1, onde é resfriado até a temperatura de -10 °C e, em seguida, enviado para a primeira coluna de destilação.

### 3.1.3 Seção Criogênica: coluna de destilação C1

A primeira coluna possui o diâmetro 1,5 metros e é constituída por um total de 20 pratos, de forma que a corrente de biogás é alimentada no décimo estágio. Esse equipamento trabalha a uma pressão de 5050 kPa e conta com um *reboiler* que utiliza a água aquecida proveniente do sistema de compressão e resfriamento, de modo que a corrente retirada no fundo apresenta a temperatura de 13,8 °C.

No topo da coluna, o resfriamento é realizado através da passagem pelo trocador de placas HX1, nesse equipamento ocorre a integração com a unidade de compressão-expansão do nitrogênio. Por fim, a razão de refluxo especificada possui o valor de 2,5 e a corrente é retirada na forma de vapor à temperatura de -70,3°C com fração molar de metano igual a 90,79%.

### 3.1.4 Seção Criogênica: coluna de destilação C2

A segunda coluna é alimentada no décimo terceiro estágio pela corrente S105, retirada no topo da primeira torre, e opera à pressão de 3950 kPa. O equipamento possui o mesmo diâmetro de 1,5 metros e é constituído por 22 pratos. De modo semelhante ao anterior, conta com um *reboiler* que realiza o aquecimento com a água proveniente do sistema de compressão e resfriamento, de forma que a corrente retirada no fundo apresenta a temperatura de 4,1 °C.

No topo da coluna, o resfriamento também é realizado através da passagem pelo trocador de placas HX1, de forma que a corrente é retirada na forma de vapor à temperatura de -87,7 °C com fração molar de metano de 99,99%. Por fim, a razão de refluxo especificada possui o valor de 4,1 e a corrente de saída é enviada para o trocador de placa HX2, também integrado à unidade de compressão-expansão do nitrogênio, onde ocorre a liquefação do biometano produzido.

### 3.1.5 Seção da unidade de compressão-expansão do nitrogênio

A unidade de refrigeração consiste em um ciclo de compressão-expansão de nitrogênio, a integração com a planta de produção de biometano é realizada através dos trocadores de placa HX1 e HX2. O primeiro trocador é utilizado para o resfriamento da corrente S101 e atua como condensador para as duas colunas criogênicas. Já o equipamento HX2 é responsável pela liquefação, através da redução de temperatura, do biometano produzido.

No ciclo, de modo geral, a corrente de nitrogênio é comprimida de 250 para 7000 kPa e resfriada até a temperatura de 35°C, em seguida é enviada para o trocador de placas HX1 e resfriada novamente até -36°C. Por fim, a corrente é direcionada para um expensor, atingindo a temperatura de -162,9°C e pressão de 250 kPa, e retorna para os trocadores HX2 e HX1, onde será responsável pelo resfriamento das demais correntes.

### 3.1.6 Seção de saída

O biometano liquefeito, produzido após a passagem no trocador de placas HX2, é enviado para um expensor, responsável por reduzir a pressão da corrente até o valor de 100 kPa.

Dessa forma, obtém-se a corrente final de LBM (*liquefied biomethane*) com composição molar de CH<sub>4</sub> igual a 99,99% e temperatura de -161,4 °C.

Simultaneamente, os produtos de fundo de ambas as colunas são unidos para a geração da corrente LCO<sub>2</sub> (*liquefied carbon dioxide*), que apresenta a pressão de 5050 kPa, temperatura de 12,7°C e composição molar de CO<sub>2</sub> igual a 99,41%.

### **3.2 PROCESSO MODIFICADO**

Devido à ausência de especificações das correntes que precedem os trocadores de placas e incorporam as colunas de destilação à unidade de compressão-expansão do nitrogênio, não foi possível simular a integração entre a planta de produção de biometano e a unidade de resfriamento. Dessa forma, fez-se necessária a proposição de soluções alternativas para que fosse possível a reprodução do processo. As modificações concebidas são apresentadas nesta seção. Somado a isso, algumas alterações foram realizadas de modo a respeitar os parâmetros e faixas de valores consolidados, que se situam dentro de um intervalo de soluções definido nas heurísticas apresentadas.

#### **3.2.1 Seção de Entrada**

A planta é alimentada por uma corrente de biogás com as mesmas condições de vazão, pressão e temperatura do processo apresentado por Hashemi *et al.* (2019). Entretanto, a composição molar do gás adotado é de 60% de metano e 40% de CO<sub>2</sub>. Diferentemente do artigo base, foram considerados apenas metano e dióxido de carbono para a corrente de entrada, uma vez que a concentração de H<sub>2</sub>S presente no biogás é significativamente pequena, inferior à 1% molar. Além disso, pré-tratamentos, como os citados no capítulo anterior, podem ser facilmente utilizados para a remoção desse e de outros compostos prejudiciais ao processo.

#### **3.2.2 Seção de compressão e resfriamento**

Para reproduzir essa etapa da simulação utilizou-se um sistema de compressão de 3 estágios, segundo a heurística de Couper *et al.* (2012). Os compressores são intercalados com

resfriadores à base de água. Nessa etapa, o biogás é comprimido até a pressão final de 5050 kPa, de modo que em cada estágio a temperatura do gás é reduzida até 40°C logo após a compressão, com exceção do último estágio em que a corrente atinge a temperatura de 37°C. As temperaturas foram alteradas respeitando os valores heurísticos propostos por Turton *et al.* (2018). Nesse processo, a temperatura da água utilizada para o resfriamento varia de 30 até 45°C.

Por fim, o biogás segue para o último trocador de calor, correspondente ao trocador de placas HX1, onde é resfriado até a temperatura de -10°C e, em seguida, enviado para a primeira coluna de destilação.

### **3.2.3 Seção Criogênica: coluna de destilação C1**

Devido à limitação imposta pela ausência de dados, não foi possível simular a integração entre o condensador da coluna e o trocador de placas HX1, associado ao ciclo de nitrogênio. Assim, se fez necessário utilizar um equipamento com condensador e *reboiler* acoplados.

Após a constatação, obtida utilizando ferramentas do próprio software, de que a corrente de topo é retirada na forma de vapor, adotou-se a utilização de um condensador do tipo *full reflux*. Por fim, manteve-se o valor da razão de refluxo e temperatura da corrente de saída especificadas no artigo.

### **3.2.4 Seção Criogênica: coluna de destilação C2**

De modo semelhante à seção anterior, foi necessária a utilização de um equipamento com condensador e *reboiler* acoplados, adotando-se o condensador do tipo *full reflux*. Da mesma maneira, manteve-se o valor da razão de refluxo e temperatura da corrente de saída especificadas no artigo.

### 3.2.5 Seção da unidade de compressão-expansão do nitrogênio

A unidade de refrigeração foi reproduzida de forma isolada, devido à limitação do software de simular a integração realizada nos equipamentos HX1 e HX2. Dessa forma, foram utilizados aquecedores e resfriadores em substituição aos trocadores de placas. O equipamento HX1 foi simulado através de dois trocadores, visto que são impostas duas passagens para a corrente de nitrogênio nesse caso.

Por fim, para a simulação da etapa de compressão e resfriamento de N<sub>2</sub> utilizou-se um sistema de compressão de 3 estágios, segundo a heurística de Couper *et al.* (2012). Os compressores apresentam 90,00% de eficiência e são intercalados com resfriadores à base de água. Nessa etapa, o nitrogênio é comprimido até a pressão final de 7000 kPa, de modo que, em cada estágio, a temperatura do gás é reduzida até 40°C logo após a compressão, com exceção do último estágio em que a corrente atinge a temperatura de 37°C. As temperaturas foram alteradas de modo a respeitar os valores heurísticos propostos por Turton *et al.* (2018).

### 3.3 PLANTA DE UTILIDADES

Visando o estudo dos sistemas de resfriamento e aquecimento pertinentes ao processo de produção de biometano e o cálculo dos ecoindicadores associados às plantas propostas, foi realizado o desenvolvimento e a simulação da planta de utilidades, que será apresentada nesta seção junto aos parâmetros aplicados.

Para a utilidade fria utiliza-se a água como fluido refrigerante. Nesse contexto, estão incluídos os resfriadores presentes entre os estágios de compressão, tanto para a planta de biometano quanto para o ciclo do nitrogênio. O sistema proposto é aberto com recirculação, de modo a reduzir o consumo de água e energia.

De acordo com as heurísticas propostas por Turton *et al.* (2018), o fluido proveniente da planta de utilidades é enviado a 30°C na pressão de 500 kPa para os trocadores de calor intercalados com os compressores da planta de biogás, durante esse processo a corrente é aquecida até 45°C. Em seguida, parte da água aquecida é direcionada para os *reboilers* das colunas de destilação criogênica, de modo que fornecem calor retornando à temperatura de 30°C.

Uma nova corrente de fluido à 30°C é somada à água retirada na saída dos *reboilers*, e utilizada para o resfriamento da seção de compressão do ciclo de nitrogênio. Nessa etapa, a água é aquecida novamente até 45°C e direcionada para a torre de resfriamento, onde tem a temperatura reduzida até 30°C e é recirculada no processo. O resfriamento é proporcionado pela ação de ventiladores presentes na torre. O sistema foi baseado no trabalho de Boyd (2011).

Somada a água que retorna da torre de resfriamento, uma corrente de *make-up* é adicionada para a reposição das perdas provenientes do arraste, evaporação, purga e vazamentos. Além disso, na seção de entrada da planta utiliza-se uma bomba para pressurizar a água a 500 kPa, permitindo seu reciclo nas operações.

De modo geral, os valores heurísticos adotados para a simulação da planta de utilidades são apresentados na Tabela 3.1.

**TABELA 3.1** – Valores heurísticos adotados para a planta de utilidades.

<b>Especificações</b>	<b>Valores heurísticos</b>
Temperatura da utilidade fria	30°C (TURTON <i>et al.</i> , 2018)
Temperatura da utilidade quente	45°C (TURTON <i>et al.</i> , 2018)
Perdas no processo	1% da vazão circulante (CAXIANO, 2020)
Perdas por evaporação e arraste (torre de resfriamento)	3% da vazão circulante [0,3% arraste + 2,68% evaporação] (SILLA, 2003)
Purga (torre de resfriamento)	3% da vazão circulante (COUPER <i>et al.</i> , 2012)

### 3.4 ECOEFICIÊNCIA

O conceito de ecoeficiência foi criado em 1992 pela *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD). Ele reúne os pilares essenciais, progresso econômico e ambiental, necessários para que a prosperidade econômica aumente com o uso mais eficiente dos recursos e com a redução de emissões. Dessa forma, trata-se de um artifício utilizado para auxiliar empresas e organizações a serem mais sustentáveis através de inovação, criação de novas tecnologias e/ou otimização de processos já existentes.

Segundo a WBCSD (2020), a ecoeficiência é alcançada pela entrega de bens e serviços com preços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas, melhorando a qualidade de vida, enquanto minimizam os impactos ambientais e a intensidade do uso de recursos naturais, considerando o ciclo integral de produção.

A fim de metrificar a ecoeficiência, surgiram os ecoindicadores, representados por uma relação de uma variável ambiental e uma variável econômica (produção ou custo de produção). Seu principal objetivo é auxiliar na tomada de decisões economicamente e ambientalmente seguras, avaliando os impactos gerados em ambas as esferas (PEREIRA *et al.*, 2018).

Usualmente, a avaliação de ecoindicadores é realizada de forma comparativa entre dois ou mais processos/cenários. A pluralidade de resultados individuais, na maioria das vezes, é complexa, o que torna sua compreensão e interpretação mais difíceis. Nesse contexto, a empresa farmacêutica BASF concebeu um método baseado no chamado *Environmental Fingerprint*, representado pelo gráfico do tipo “radar”. O intuito do gráfico é analisar em qual âmbito as alternativas devem sofrer algum tipo de melhoria a fim de mitigar os impactos gerados (SALING *et al.*, 2002).

No presente trabalho os seguintes indicadores serão desenvolvidos, baseados no trabalho de Siitonen; Tuomaala; Ahtila (2010):

- Consumo de Água ( $\text{m}^3$  de  $\text{H}_2\text{O}$ /t produto): razão do total de água consumida em um período pela produção total de biometano e  $\text{CO}_2$  equivalente;
- Emissão de  $\text{CO}_2$  (t  $\text{CO}_2$ /t produto): razão do total de emissão de  $\text{CO}_2$  (combustão, emissão indireta e fugitiva) em um período pela produção total de biometano e  $\text{CO}_2$  líquido equivalente;
- Custo específico de utilidades (US\$/h): razão do total de custos de utilidades da planta por hora.

## **CAPÍTULO 4**

### **METODOLOGIA**

Neste capítulo, aborda-se a metodologia aplicada para os estudos propostos no presente trabalho. A partir da reprodução do artigo e com base nos dados disponibilizados foram simulados diferentes cenários, variando-se a composição do biogás alimentado na planta, para posterior análise e comparação dos indicadores de ecoeficiência. Ademais, realizou-se uma análise de sensibilidade para o estudo da influência da razão de refluxo e pressão nas colunas criogênicas, com o objetivo de determinar as melhores condições de operação para os cenários distintos do artigo.

Somado a isso, as considerações adotadas para a simulação do processo são apresentadas, assim como os cenários considerados, as propostas de aprimoramento e o desenvolvimento da planta de utilidades. Por fim, descreve-se a metodologia empregada para a análise de ecoeficiência, incluindo as equações e heurísticas adotadas.

#### **4.1 MODELO TERMODINÂMICO**

O *software* Aspen Hysys 2.2<sup>®</sup>, utilizado para realizar as simulações do presente trabalho, permite a escolha do pacote termodinâmico adotado, o qual determina as equações de estado e os modelos matemáticos aplicados para o cálculo das propriedades dos componentes empregados no processo, tanto em estado líquido como vapor, nas formas pura, diluída ou em misturas. Dentre os pacotes mais conhecidos disponíveis na versão utilizada do software estão: Antoine, Margules, UNIQUAC, NRTL, Peng Robinson, Sour SRK, entre outros.

Segundo Langè *et al.* (2015), o pacote de *Soave-Redlich-Kwong* (SRK) apresenta elevada confiabilidade para a simulação de processos de destilação realizados em baixas temperaturas. O mesmo autor realizou em seu trabalho a validação do modelo SRK para o cálculo do equilíbrio líquido-vapor considerando o sistema binário de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, de modo que os resultados obtidos através do software Hysys 7.3<sup>®</sup> foram correspondentes aos dados experimentais disponibilizados na literatura. Somado a isso, o trabalho de Hashemi *et al.* (2019), adotado como referência, assume a equação de *Soave-Redlich-Kwong* para o desenvolvimento do processo.

Nesse contexto, é possível apresentar também o pacote Sour SRK que combina o modelo de *Soave Redlich Kwong* com o de WILSON API. Esse pacote é geralmente aplicado em processos que envolvem gases ácidos, água e hidrocarbonetos (BARROSO e FERREIRA, 2015). Dessa forma, para fins comparativos e visando a confiabilidade dos resultados, as simulações para a planta de aprimoramento do biogás deste trabalho foram realizadas mediante aplicação do pacote Sour SRK.

Além do modelo de *Soave-Redlich-Kwong*, o pacote *Universal Quasi Chemical* (UNIQUAC) foi utilizado para a simulação da planta de utilidades, visto que se trata de um modelo adequado para a descrição de equilíbrios em fase líquida, considerando o tamanho e a natureza das moléculas, assim como as forças intermoleculares do sistema soluto-solvente (CAXIANO, 2020).

## 4.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE REFERÊNCIA

Para a simulação do processo modelo foram considerados os dados e especificações apresentados pelo trabalho proposto por Hashemi *et al.* (2019). A corrente de biogás utilizada para a alimentação da planta possui as mesmas condições de vazão, pressão e temperatura, apresentando como única divergência a ausência de H<sub>2</sub>S em sua composição. Somado a isso, todos os equipamentos foram dimensionados de acordo com o processo referenciado. A síntese da metodologia aplicada é apresentada na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Metodologia para a simulação do processo de referência.

<b>Metodologia</b>	
Tema	Simulação do processo de referência
Referência	Hashemi <i>et al.</i> (2019)
Objetivo	Validação dos resultados obtidos via simulação computacional
<i>Software</i>	Aspen Hysys 2.2 <sup>®</sup>
Pacote termodinâmico	Sour SRK
Regime	Estacionário
Componentes	CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
Especificação da alimentação	Corrente de biogás com composição de 60% molar de CH <sub>4</sub> e 40% de CO <sub>2</sub> , na pressão de 100 kPa e temperatura de 35 °C
Considerações	Ausência de perda de carga nos trocadores de calor
Validação de resultados	Análise dos resultados obtidos visando desvios relativos inferiores a 10,00 % para correntes de massa e energia

### 4.3 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Visando-se a análise comparativa entre os 3 cenários, considerou-se a faixa típica de composição do biogás proveniente de aterros e a composição média do gás gerado em um aterro real em São Paulo. Dessa forma, foram analisados os seguintes casos:

1. Biogás de aterro com composição máxima de metano (BPR) de 60% molar de CH<sub>4</sub> e 40% de CO<sub>2</sub>;
2. Biogás real com dados obtidos do aterro Caieira – SP (BA<sub>t</sub>), de composição molar de 58,7% de CH<sub>4</sub> e 41,3% de CO<sub>2</sub> (CANDIANI e TORRES, 2014);
3. Biogás de aterro com composição mínima de metano (BMin) de 45% molar de CH<sub>4</sub> e 55% de CO<sub>2</sub>.

A síntese da metodologia aplicada é apresentada na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** – Metodologia para a simulação dos cenários propostos.

<b>Metodologia</b>	
Tema	Simulação dos cenários propostos para comparação
Referência	Hashemi <i>et al.</i> (2019), Candiani e Torres (2014)
Objetivo	Obtenção de dados para o estudo comparativo dos cenários propostos, para a análise de sensibilidade e cálculo dos ecoindicadores
<i>Software</i>	Aspen Hysys 2.2 <sup>®</sup>
Pacote termodinâmico	Sour SRK
Regime	Estacionário
Componentes	CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
Especificação da alimentação	Corrente de biogás com composição variável, na pressão de 100 kPa e temperatura de 35 °C
Considerações	Ausência de perda de carga nos trocadores de calor ou tubulações

#### 4.4 SIMULAÇÃO DA PLANTA DE UTILIDADES

A planta de utilidades foi desenvolvida de modo a atender as considerações apresentadas no artigo base e aos valores heurísticos adotados. A simulação foi elaborada conforme o tópico abordado no Capítulo 3 utilizando-se o modelo termodinâmico UNIQUAC. Os valores de energia associados à execução do processo foram especificados na planta de utilidades, possibilitando o cálculo da vazão de água necessária para a operação dos sistemas de

resfriamento e aquecimento. A síntese da metodologia e das considerações aplicadas é apresentada na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Metodologia para a simulação da planta de utilidades.

<b>Metodologia</b>	
Tema	Simulação da planta de utilidades
Referência	Hashemi <i>et al.</i> (2019), Turton <i>et al.</i> (2018), Caxiano (2020), Silla (2003), Couper <i>et al.</i> (2012), Boyd (2011)
Objetivo	Obtenção da vazão de água para a reposição da planta de utilidades e dos dados pertinentes ao cálculo dos ecoindicadores.
Software	Aspen Hysys 2.2 <sup>®</sup>
Pacote termodinâmico	UNIQUAC
Regime	Estacionário
Componentes	H <sub>2</sub> O
Água de <i>makeup</i> (reposição)	Alimentada nas condições de 101,33 kPa e 30°C
Água para resfriamento	Pressão de 500 kPa com temperatura inicial de 30 °C e final de 45°C
Água para aquecimento	Pressão de 500 kPa com temperatura inicial de 45 °C e final de 30°C
Torre de resfriamento	Alimentada com água nas condições de 500 kPa e 45°C com saída à 101,33 kPa e 30 °C
Perdas	No processo: 1%
	Por evaporação: 2,68%
	Por arraste: 0,3%
	Purga: 3%
Considerações	Ausência de perda de carga nos trocadores de calor Bombas operando com 75,00% de eficiência adiabática

#### 4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Visando a obtenção de melhores composições para o gás retirado no topo da primeira coluna de destilação e a conservação da qualidade do biometano gerado ao fim do processo de referência, considerando os cenários do aterro em Caieiras-SP e do biogás com composição mínima de metano, realizou-se uma análise de sensibilidade para a seleção das condições operacionais recomendadas.

Para o estudo foram consideradas variações na razão de reciclo e na pressão de operação apenas da primeira coluna de destilação, visto que para a segunda coluna as especificações da alimentação se assemelhavam às da primeira, resultando em correntes finais correspondentes. Essas condições podem ser modificadas com maior facilidade, operacionalmente, sem que sejam necessárias alterações na planta de processo. Dessa forma, após a análise, foram coletados os dados referentes à composição e vazão da corrente de topo, assim como as energias associadas à operação do condensador e *reboiler*.

Os pontos foram selecionados a partir dos resultados obtidos visando a maior eficiência da planta, de modo que fosse possível alcançar os melhores valores de vazão molar da corrente de topo com composição de CH<sub>4</sub> acima de 90,00%, atingindo as especificações do biometano de acordo com a norma ANP nº 685/2017. A síntese da metodologia aplicada para essa etapa da análise é apresentada na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4** – Metodologia para a análise de sensibilidade.

<b>Metodologia</b>	
Tema	Análise de sensibilidade
Referência	Hashemi <i>et al.</i> (2019)
Objetivo	Obtenção da razão de refluxo e pressão de operação da coluna de destilação recomendadas para a melhor eficiência da planta, considerando os cenários do biogás de composição mínima de metano e de Caieiras-SP
<i>Software</i>	Aspen Hysys 2.2 <sup>®</sup>
Pacote termodinâmico	Sour SRK

**Tabela 4.4** – Metodologia para a análise de sensibilidade (continuação).

<b>Metodologia</b>	
Regime	Estacionário
Componentes	CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub>
Variação das razões de refluxo	1; 2; 2,5; 4; 6 e 8
Variação da pressão de operação	Mais ou menos 5% da pressão original, com 3 pontos acima (5134,2; 5218,3; e 5302,5 kPa) e 3 abaixo (4797,5; 4881,7; 4965,8 kPa) da pressão de referência (5050 kPa).
Especificações da coluna	Razão de refluxo Fração molar de CO <sub>2</sub> de 99,37% na corrente de fundo
Seleção dos pontos de interesse	Produto de topo com fração molar de CH <sub>4</sub> igual ou superior a 90,00% Menor valor da razão de energia gasta para a operação da coluna por vazão molar de CH <sub>4</sub>

Após a definição dos pontos de interesse, as regiões próximas foram selecionadas para dar sequência ao estudo objetivando o aprimoramento da análise. Novamente foram consideradas variações na razão de reciclo com valores próximos aos das condições obtidas, mantendo-se os níveis de pressão avaliados anteriormente. A síntese da metodologia aplicada para essa etapa da análise é apresentada na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5** – Metodologia para o aprimoramento da análise de sensibilidade.

<b>Metodologia</b>	
Tema	Aprimoramento da análise de sensibilidade
Referência	Hashemi <i>et al.</i> (2019)
Objetivo	Obtenção da razão de refluxo da coluna de destilação recomendada para a melhor eficiência da planta, considerando os cenários do biogás de composição mínima de metano e de Caieiras-SP

**Tabela 4.5** – Metodologia para o aprimoramento da análise de sensibilidade (continuação).

<b>Metodologia</b>	
<i>Software</i>	Aspen Hysys 2.2 <sup>®</sup>
Pacote termodinâmico	Sour SRK
Regime	Estacionário
Componentes	CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub>
Variação das razões de refluxo	Biogás de composição mínima de CH <sub>4</sub> : 2,25 e 2,75 Biogás do aterro de Caieiras-SP: 1,5, 1,75 e 2,25
Variação da pressão de operação	Mais ou menos 5% da pressão original, com 3 pontos acima (5134,2; 5218,3; e 5302,5 kPa) e 3 abaixo (4797,5; 4881,7; 4965,8 kPa) da pressão de referência (5050 kPa).
Especificações da coluna	Razão de refluxo Fração molar de CO <sub>2</sub> de 99,37% na corrente de fundo
Seleção dos pontos de interesse	Produto de topo com fração molar de CH <sub>4</sub> igual ou superior a 90,00% Menor valor da razão de energia gasta para a operação da coluna por vazão molar de CH <sub>4</sub>

Com esses resultados, foi possível obter as simulações considerando as condições de operação que geram maior eficiência para a planta em cada caso.

#### 4.6 ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA

Esta seção descreve a metodologia aplicada para o cálculo dos indicadores ambientais e econômico. Os ecoindicadores foram calculados a partir dos dados obtidos através das simulações dos processos e de suas respectivas plantas de utilidades.

Para esta análise foram considerados tanto os 3 cenários propostos que mantêm as condições de razão de refluxo e pressão de operação fornecidas pelo artigo, quanto os casos nas condições selecionadas através da análise de sensibilidade. Todos os três indicadores utilizados são expressos em termos da taxa de produção, calculada a partir da vazão mássica das correntes de produtos obtidas (LBM e LCO<sub>2</sub>).

O ecoindicador de emissão de CO<sub>2</sub> (CDE) foi calculado a partir da Equação 4.1, em  $t_{CO_2}/t$  na qual  $Q_{cald}$  e  $Q_{fornalha}$  correspondem, respectivamente, ao consumo de energia da caldeira e da fornalha na planta de utilidades em GJ/h, e  $P_{bombas}$ ,  $P_{comp}$  e  $P_{tresf}$  aos consumos totais de eletricidade em GJ/h das bombas, compressores e torre de resfriamento, respectivamente. Neste trabalho, não foram utilizadas caldeiras, fornalhas ou *flare*, sendo o consumo energético proveniente dos demais equipamentos.

$$CDE = \frac{\left(\frac{Q_{cald}}{\theta_{cald}} + \frac{Q_{fornalha}}{\eta}\right) \cdot \xi_{comb} + (P_{bombas} + P_{comp} + P_{tresf}) \cdot \xi_{ele} + mCO_2(flare)}{\text{Taxa de produção}} \quad (4.1)$$

Para o fator de emissão indireta de CO<sub>2</sub> por eletricidade,  $\xi_{ele}$ , adotou-se o valor de 0,0268 tCO<sub>2</sub>/GJ, considerando a matriz energética brasileira (MCTI, 2021).

Somado a isso, o consumo energético, em GJ/h, associado à operação dos ventiladores da torre de resfriamento foi calculado segundo a Equação 4.2 de acordo com o trabalho de Caxiano (2020), que considera as temperaturas inicial e final da água utilizada para o processo de resfriamento e as condições do ar do Rio de Janeiro, adotando para a torre o valor de área específica de 0,168 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>/h). Adicionalmente, considera para o desempenho da torre o valor de 90%, de modo que os ventiladores são especificados com uma potência por área de 8,67.10<sup>-4</sup> (GJ/h)/ft<sup>2</sup>. Dessa forma, o cálculo é realizado em função da vazão de entrada de água na torre de resfriamento,  $F_{tresf}$ , em m<sup>3</sup>/h.

$$P_{tresf} = F_{tresf} \cdot 1,45 \cdot 10^{-4} \quad (4.2)$$

Já o indicador de consumo de água (WC) foi calculado conforme a Equação 4.3. A parcela que corresponde à geração de vapor foi desconsiderada devido à ausência do processo na planta de utilidades. O cálculo foi efetuado em termos da corrente de total *makeup* de água, em  $m_{H_2O}^3/t$ .

$$WC = \frac{Makeup_{resf} + Makeup_{vap}(includo\ demanda\ \acute{a}gua - vapor) - Vapor\ gerado(exportado)}{Taxa\ de\ reprodu\c{a}o} \quad (4.3)$$

Por fim, calculou-se o indicador de custo específico de utilidades (CEU), em US\$/h, conforme Equação 4.4.

$$CEU = \frac{\left(\frac{Q_{cald}}{\theta_{cald}} + \frac{Q_{fornalha}}{\eta}\right) \cdot C_{GN} + (P_{bombas} + P_{comp} + P_{tresf} + P_{air}) \cdot C_{EE} + m_{total} \cdot C_{PW} + m_{CW} \cdot C_{ICW} + m_{SG} \cdot C_{ESG} + m_{HPW} \cdot C_{LHPW} + m_{WW} \cdot C_{LWW}}{Taxa\ de\ produ\c{a}o} \quad (4.4)$$

Nesta relação, a parcela  $P_{air}$  equivale ao consumo de energia elétrica nos refrigeradores a ar, em GJ/h, e pode ser desconsiderada devido à ausência desses equipamentos na planta. Já  $m_{total}$  corresponde à vazão volumétrica total de água para utilidades em  $m^3/h$ , enquanto a vazão volumétrica para a torre de resfriamento é dada por  $m_{CW}$  na mesma unidade. De modo semelhante, a parcela  $m_{SG}$  equivale a vazão volumétrica de água para a geração de vapor e pode ser anulada, pois não há necessidade do mesmo para o aquecimento realizado no processo.

Além disso, o termo  $m_{HPW}$  pode ser desconsiderado, visto que corresponde à vazão volumétrica de água de alta pureza, utilizada no processo em reatores e colunas de extração líquido-líquido. A parcela  $m_{WW}$  equivale a vazão volumétrica de efluentes, em  $m^3/h$ , e pode ser calculada de acordo com a Equação 4.5.

$$m_{WW} = m_{CW} - (m_{arraste} + m_{evap}) + m_{SG} + m_{PWW} \quad (4.5)$$

As perdas na torre de resfriamento por arraste ( $m_{arraste}$ ) e evaporação ( $m_{evap}$ ) são somadas e, posteriormente, subtraídas da corrente  $m_{CW}$ . Nessa relação, a vazão de efluentes de processo ( $m_{PWW}$ ) é inserida e corresponde à vazão de água de alta pureza ou água gerada como produto de reações, sendo nesse caso desconsiderada.

Ademais, as definições de custos e seus respectivos valores são disponibilizados na Tabela 4.6. Diante disto, é importante salientar que para o custo de tratamento de efluentes adotou-se o fator primário (filtração).

**Tabela 4.6** – Valores de custos com utilidades.

<b>Utilidade</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Preço</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Custo do Gás Natural	$C_{GN}$	5,0	US\$/GJ	EIA (2021)
Custo de Energia Elétrica	$C_{EE}$	18,72	US\$/GJ	Turton <i>et al.</i> (2018)
Custo de Água de Alta Pureza	$C_{HPW}$	0,177	US\$/m <sup>3</sup>	Turton <i>et al.</i> (2018)
Custo de Água de Processo	$C_{PW}$	0,0157	US\$/m <sup>3</sup>	Turton <i>et al.</i> (2018)
Custo de Tratamento de água de resfriamento	$C_{ICW}$	0,0347	US\$/m <sup>3</sup>	Turton <i>et al.</i> (2018)
Custo de Tratamento de água para vapor	$C_{tSG}$	0,156	US\$/m <sup>3</sup>	Turton <i>et al.</i> (2018)
<b>Custo de Tratamento de Efluentes</b>				
Primário (filtração)	$C_{tWW}$	0,0041	US\$/m <sup>3</sup>	Turton <i>et al.</i> (2018)
Secundário (filtração+lodo ativado)	$C_{tWW}$	0,0043	US\$/m <sup>3</sup>	Turton <i>et al.</i> (2018)
Terciário (filtração+lodo ativado+químicos)	$C_{tWW}$	0,0056	US\$/m <sup>3</sup>	Turton <i>et al.</i> (2018)

#### 4.7 ÍNDICE COMPARATIVO DE ECOEFICIÊNCIA

As cinco configurações do processo de aprimoramento de biogás a biometano (3 cenários propostos nas condições do artigo e 2 aprimorados de acordo com a análise de sensibilidade) foram avaliadas por meio do Índice Comparativo de Ecoeficiência (ICE) com base nos três indicadores apresentados no item 4.6.

O método ICE possibilita a análise comparativa entre as configurações dos processos propostos, de modo que é fundamentado na normalização dos indicadores considerados, permitindo a melhor visualização dos resultados. Dessa forma, realiza-se a divisão de cada indicador pelo maior valor de sua respectiva categoria e os dados obtidos são então apresentados em gráficos de radar, onde os vértices representam os indicadores de cada processo. Esta forma

de representação promove melhor análise e entendimento dos diferentes aspectos de sustentabilidade de cada cenário (CAXIANO, 2020).

O cálculo das áreas  $S$  referentes a cada gráfico é realizado mediante a aplicação da Lei dos Senos conforme a Equação 4.6, onde a letra  $n$  corresponde ao número total de indicadores e  $EI$  aos valores normalizados (CAXIANO, 2020).

$$S = 0,5 \cdot \sin(2\pi/n) \cdot \left( EI_1 \cdot EI_n + \sum_{i=1}^{n-1} EI_i \cdot EI_{i+1} \right) \quad (4.6)$$

Dessa forma, o índice de cada processo é calculado levando em consideração tanto a área de seu respectivo gráfico como a área do maior gráfico obtido ( $S_{MAX}$ ), conforme a Equação 4.7 (CAXIANO, 2020).

$$ICE = \left( 1 - \frac{S}{S_{MAX}} \right) \cdot 100\% \quad (4.7)$$

Áreas pequenas indicam a geração de impactos ambientais menores, levando em consideração os ecoindicadores estudados, de modo que a obtenção de maiores valores de ICE resultam em maior ecoeficiência do processo.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são abordados os resultados obtidos no presente trabalho. Dessa forma, os dados referentes à simulação realizada para o processo de referência são comparados aos disponibilizados pelo artigo base para que seja possível a validação.

Em seguida, são apresentadas as simulações para as propostas de análise de sensibilidade, além da planta de utilidades e os resultados obtidos para os consumos de água, geração de CO<sub>2</sub> e custo específico de utilidades de cada cenário. Por fim, são apresentados os resultados para os indicadores e a avaliação da ecoeficiência proposta no Capítulo 4.

#### **5.1 SIMULAÇÕES NAS CONDIÇÕES DO ARTIGO DE REFERÊNCIA**

As simulações do processo de referência e dos cenários propostos são apresentadas nesta seção, assim como as discussões pertinentes para a validação de dados e análise de resultados.

##### **5.1.1 Cenário de referência - composição máxima de metano**

O processo de aprimoramento do biogás para biometano foi simulado de acordo com as considerações descritas na seção 3.2. O fluxograma da simulação no Hysys 2.2<sup>®</sup> é ilustrado na Figura 5.1, enquanto a Tabela 5.1 apresenta os resultados referentes às correntes materiais e a comparação com os dados do autor de referência. A validação dos resultados foi efetivada por meio dos desvios percentuais, sendo desejado valores que não ultrapassassem 10,00 %.



**Tabela 5.1** – Resultados da simulação para o cenário de referência.

Corrente		Vazão (kmol/h)	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	XCH <sub>4</sub>	XCO <sub>2</sub>	XH <sub>2</sub> S
BIOGAS	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	100,0	0,600	0,399	0,0010
	Hysys v2.2	1000,00	35,00	100,0	0,600	0,400	0
	Desvio (%)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,25%	-
S101	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	5050,0	0,600	0,399	0,0010
	Hysys v2.2	1000,00	37,00	5050,0	0,600	0,400	0
	Desvio (%)	0,00%	5,71%	0,00%	0,00%	0,25%	-
S103	Hashemi et al (2019)	659,50	-70,30	5050,0	0,908	0,092	0,0002
	Hysys v2.2	659,48	-70,30	5050,0	0,908	0,092	0
	Desvio (%)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-
S104	Hashemi et al (2019)	340,50	13,80	5050,0	0,004	0,994	0,0027
	Hysys v2.2	340,52	13,87	5050,0	0,003	0,997	0
	Desvio (%)	0,01%	0,47%	0,00%	9,57%	0,31%	-
S106	Hashemi et al (2019)	598,60	-87,70	3950,0	1,000	0,000	0
	Hysys v2.2	598,60	-87,82	3950,0	1,000	0,000	0
	Desvio (%)	0,00%	0,14%	0,00%	0,00%	0,00%	-
S107	Hashemi et al (2019)	60,90	4,10	3950,0	0,003	0,996	0,0013
	Hysys v2.2	60,88	3,44	3950,0	0,005	0,995	0
	Desvio (%)	0,03%	16,00%	0,00%	66,67%	0,14%	-
LBM	Hashemi et al (2019)	598,60	-161,40	100,0	1,000	0,000	0
	Hysys v2.2	598,60	-161,33	100,0	1,000	0,000	0
	Desvio (%)	0,00%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	-
LCO <sub>2</sub>	Hashemi et al (2019)	401,40	12,70	5050,0	0,003	0,994	0,0025
	Hysys v2.2	401,40	12,70	5050,0	0,004	0,996	0
	Desvio (%)	0,00%	0,00%	0,00%	4,40%	0,24%	-

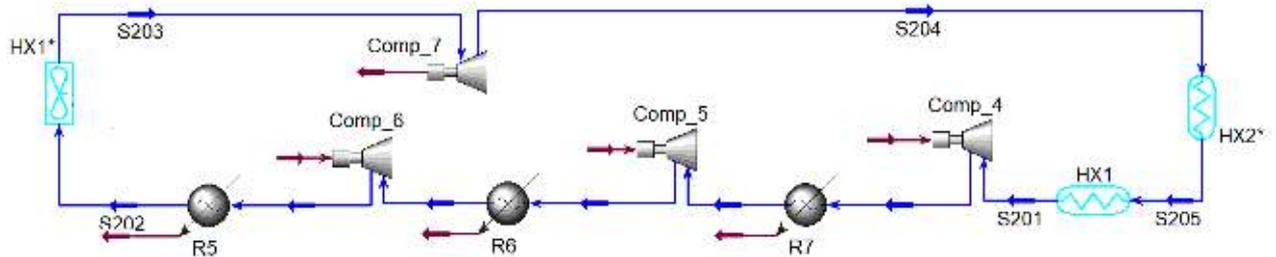
Os resultados apresentados na Tabela 5.1 demonstram que os desvios nas condições de cada corrente foram mínimos, com algumas exceções. O maior desvio na temperatura se deve ao fato de que se preferiu especificar a temperatura de 37°C, de modo a respeitar os valores heurísticos para resfriamento no Brasil. Somado a isso, a discrepância na temperatura observada para a corrente S107 pode ser justificada pela ausência de H<sub>2</sub>S na composição do biogás alimentado no processo, visto que esse composto é retirado na forma líquida no fundo da coluna de destilação do processo original. Dessa forma, variações nas composições das correntes resultam em modificações das propriedades termodinâmicas e, conseqüentemente, das energias necessárias para a retirada nas condições demandadas.

As divergências encontradas na composição molar de CH<sub>4</sub> nas correntes S104 e S107, ambas correntes de fundo das colunas, também podem ser atribuídas a ausência de H<sub>2</sub>S na composição do biogás, de modo que, por se tratar de valores absolutos significativamente pequenos, resultaram em grandes desvios relativos. Somado a isso, as diferenças inerentes aos softwares de simulação podem causar divergências nos resultados alcançados, uma vez que para este trabalho adotou-se a versão do Hysys 2.2<sup>®</sup> enquanto o estudo de referência fez uso do Hysys 9.0<sup>®</sup>.

Os demais resultados para as principais correntes foram encontrados com pequenos desvios relativos, adequando-se ao critério de tolerância de 10,00%. Isto, somado às justificativas supracitadas para os resultados que apresentaram maiores desvios, permitiu validar os resultados obtidos pela simulação.

A Figura 5.2 apresenta o fluxograma da simulação realizada para o ciclo de nitrogênio, mediante a aplicação das adaptações necessárias.

**Figura 5.2** – Simulação do ciclo de nitrogênio para o cenário de referência



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados atingidos para as principais correntes de massa do ciclo de nitrogênio. De modo semelhante, os valores obtidos através do software Hysys 2.2<sup>®</sup> são comparados com os dados de referência disponibilizados por Hashemi *et al.* (2019).

**Tabela 5.2** – Resultados de simulação para o ciclo de nitrogênio.

	<b>Corrente</b>	<b>Vazão (kmol/h)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>
	Hashemi et al (2019)	6400	32,7	250
S201	Hysys v2.2	6800	32,7	250
	Desvio (%)	6,25%	0,00%	0,00%
	Hashemi et al (2019)	6400	35,0	7000
S202	Hysys v2.2	6800	37,0	7000
	Desvio (%)	6,25%	5,71%	0,00%
	Hashemi et al (2019)	6400	-36,0	7000
S203	Hysys v2.2	6800	-32,4	7000
	Desvio (%)	6,25%	9,92%	0,00%
	Hashemi et al (2019)	6400	-162,9	250
S204	Hysys v2.2	6800	-154,2	250
	Desvio (%)	6,25%	5,32%	0,00%
	Hashemi et al (2019)	6400	-136,2	250
S205	Hysys v2.2	6800	-128,9	250
	Desvio (%)	6,25%	5,36%	0,00%

A vazão molar de nitrogênio foi obtida de modo a considerar os valores de temperatura das correntes fornecidas pelo artigo base e a troca térmica realizada nos condensadores das colunas de destilação e nos trocadores R4 e HX2, simulados na planta principal. O balanço energético foi efetuado mediante os valores de energia trocados nos equipamentos supracitados e nos trocadores HX1, HX1\* e HX2\*, presentes no ciclo de nitrogênio.

Os desvios relativos calculados foram inferiores a 10,00%, valor plausível considerando a impossibilidade de integração entre os equipamentos e a necessidade de adaptações nas plantas propostas.

### 5.1.2 Cenário do biogás - Aterro em Caieiras-SP

As seguintes simulações foram realizadas considerando a composição do biogás proveniente do aterro de Caieiras, localizado em SP. Nesse caso, não foram aplicadas alterações nas condições fornecidas pelo trabalho de referência, i.e., a razão de refluxo e a pressão de operação das colunas de destilação se mantiveram como descritas no artigo base.

Os dados obtidos na simulação são evidenciados e comparados aos valores obtidos por Hashemi *et al.* (2019) na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Resultados da simulação para o cenário de Caieiras-SP.

Corrente		Vazão (kmol/h)	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	XCH <sub>4</sub>	XCO <sub>2</sub>
BIOGAS	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	100,0	0,600	0,399
	Hysys v2.2	1000,00	35,00	100,0	0,588	0,412
S101	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	5050,0	0,600	0,399
	Hysys v2.2	1000,00	37,00	5050,0	0,588	0,412
S103	Hashemi et al (2019)	659,50	-70,30	5050,0	0,908	0,092
	Hysys v2.2	659,48	-67,69	5050,0	0,892	0,108
S104	Hashemi et al (2019)	340,50	13,80	5050,0	0,004	0,994
	Hysys v2.2	340,52	14,50	5050,0	0,000	1,000
S106	Hashemi et al (2019)	598,60	-87,70	3950,0	1,000	0,000
	Hysys v2.2	598,59	-85,96	3950,0	0,983	0,017
S107	Hashemi et al (2019)	60,90	4,10	3950,0	0,003	0,996
	Hysys v2.2	60,89	4,72	3950,0	0,000	1,000
LBM	Hashemi et al (2019)	598,60	-161,40	100,0	1,000	0,000
	Hysys v2.2	598,59	-161,30	100,0	0,983	0,017
LCO <sub>2</sub>	Hashemi et al (2019)	401,40	12,70	5050,0	0,003	0,994
	Hysys v2.2	401,41	13,43	5050,0	0,000	1,000

Os resultados de composição das correntes principais apresentaram valores relativamente próximos aos disponibilizados pelo trabalho de referência, visto que a composição do biogás proveniente do aterro de Caieiras possui variações mínimas quando comparada à corrente de alimentação adotada pelo autor mencionado. O mesmo padrão é observado para as temperaturas das correntes retiradas no topo e fundo de ambas as colunas de destilação.

O produto final (LBM) obtido nesse cenário também se encontra dentro das especificações exigidas para a caracterização como biometano, com fração molar de CH<sub>4</sub> superior a 90,00%, apesar da utilização de um biogás com menor concentração de metano como precursor na planta de processo.

A avaliação da energia e dos impactos ambientais associados ao aprimoramento do biogás considerado será realizada, posteriormente, através da análise dos ecoindicadores selecionados.

### **5.1.3 Cenário do biogás - composição mínima de metano**

As seguintes simulações foram realizadas considerando o cenário desfavorável, em que o gás adotado como precursor apresenta a menor concentração de CH<sub>4</sub>, conforme os valores da faixa de composição típica do biogás proveniente de aterros. Do mesmo modo que o item anterior, não foram aplicadas alterações nas condições fornecidas pelo trabalho de referência (razão de refluxo e pressão de operação das colunas de destilação).

Os dados são evidenciados e comparados aos valores obtidos por Hashemi *et al.* (2019) na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4** – Resultados da simulação para o cenário de biogás com composição mínima.

Corrente		Vazão (kmol/h)	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	XCH <sub>4</sub>	XCO <sub>2</sub>
BIOGAS	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	100,0	0,600	0,399
	Hysys v2.2	1000,00	35,00	100,0	0,450	0,550
S101	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	5050,0	0,600	0,399
	Hysys v2.2	1000,00	37,00	5050,0	0,450	0,550
S103	Hashemi et al (2019)	659,50	-70,30	5050,0	0,908	0,092
	Hysys v2.2	659,50	-35,71	5050,0	0,682	0,318
S104	Hashemi et al (2019)	340,50	13,80	5050,0	0,004	0,994
	Hysys v2.2	340,50	14,51	5050,0	0,000	1,000
S106	Hashemi et al (2019)	598,60	-87,70	3950,0	1,000	0,000
	Hysys v2.2	598,60	-47,69	3950,0	0,752	0,248
S107	Hashemi et al (2019)	60,90	4,10	3950,0	0,003	0,996
	Hysys v2.2	60,90	4,72	3950,0	0,000	1,000
LBM	Hashemi et al (2019)	598,60	-161,40	100,0	1,000	0,000
	Hysys v2.2	598,60	-160,72	100,0	0,752	0,248
LCO <sub>2</sub>	Hashemi et al (2019)	401,40	12,70	5050,0	0,003	0,994
	Hysys v2.2	401,40	13,43	5050,0	0,000	1,000

Os resultados de composição das correntes principais apresentaram valores com divergência significativa dos disponibilizados pelo trabalho de referência, visto que a composição do biogás adotado para a alimentação do processo foi alterada de forma considerável. De forma semelhante, observam-se grandes variações de temperatura nas correntes que são retiradas das colunas de destilação, fato que também pode ser justificado pela modificação da composição do gás utilizado como precursor do processo.

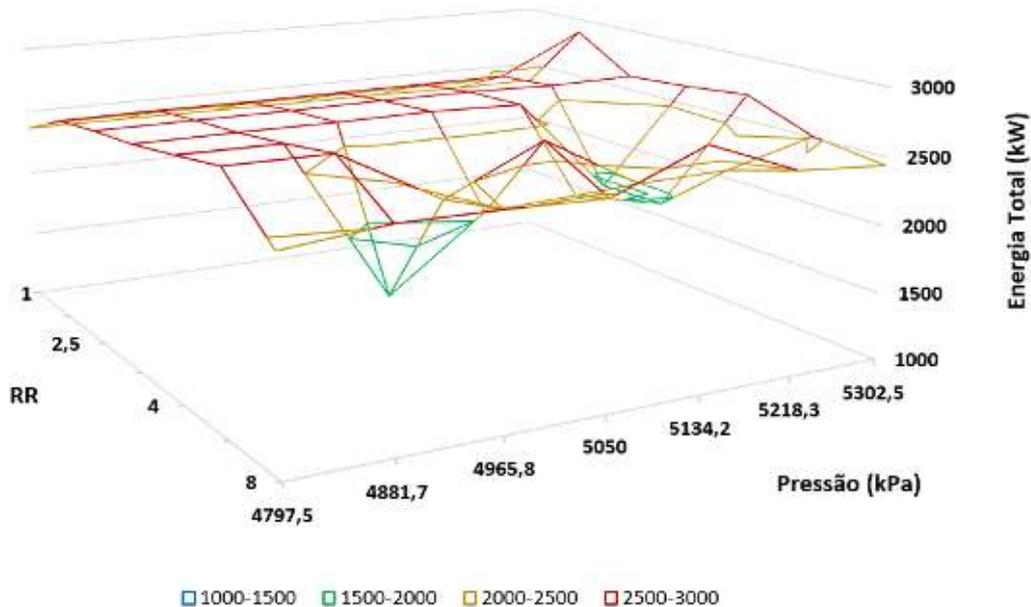
O produto final (LBM) obtido nesse cenário não atende às especificações exigidas para a caracterização e comercialização como biometano, apresentando fração molar de  $\text{CH}_4$  igual a 75,20%. Somado a isso, as temperaturas alcançadas após a passagem nos condensadores *full reflux* das colunas de destilação apresentaram desvios significativos. Esse fato também pode ser explicado por conta da variação de composição das correntes de topo, que são retiradas na forma de vapor nas pressões especificadas.

## 5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O estudo foi conduzido seguindo a metodologia explicitada no capítulo anterior, de modo que a análise foi realizada a partir dos dados coletados, referentes à composição e vazão da corrente de topo, assim como as energias associadas à operação do condensador e *reboiler*.

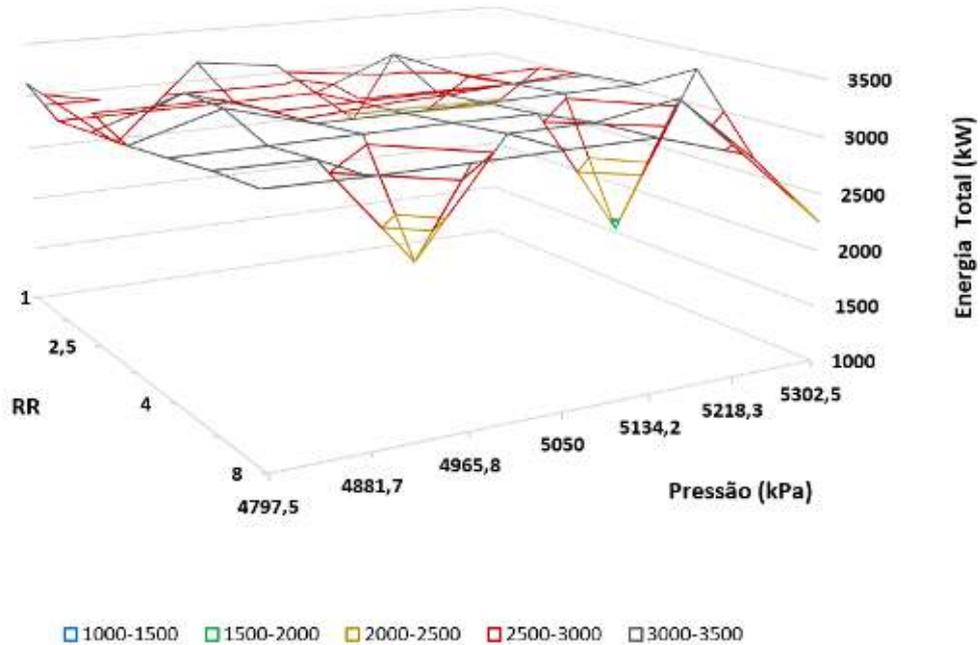
Os dados para os cenários analisados podem ser observados através da Figura 5.3 e Figura 5.4 que relacionam, para cada caso, as energias necessárias e as razões de refluxo (RR) e pressões de operação (P) associadas.

**Figura 5.3** – Análise de sensibilidade para o cenário de biogás de Caieiras-SP.



Fonte: Autoria própria.

**Figura 5.4** – Análise de sensibilidade para o cenário de biogás com composição mínima.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, a partir dos resultados obtidos os melhores pontos foram selecionados, considerando-se o produto de topo com fração molar de  $\text{CH}_4$  igual ou superior a 90,00% e o menor valor da razão de energia gasta para a operação da coluna por vazão molar de  $\text{CH}_4$ . A Tabela 5.5 evidencia as condições ideais encontradas após realização da primeira etapa da análise de sensibilidade.

**Tabela 5.5** – Resultados da primeira análise de sensibilidade.

<b>Cenário: Caieiras – Composição Mínima</b>	<b>RR</b>	<b>P (kPa)</b>	<b><math>\text{CH}_4</math> (% molar)</b>	<b>Demanda total energética (kW)/Vazão de <math>\text{CH}_4</math> (kmol/h)</b>
BA <sub>T</sub>	2	4797,5	91,05%	4,36
BMin	2,5	4797,5	90,06%	6,62

Em seguida, as regiões próximas aos pontos selecionados foram estudadas segundo a metodologia descrita na Seção 4.5. Os resultados da segunda análise de sensibilidade podem ser observados na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6** – Resultados da segunda análise de sensibilidade.

<b>Cenário: Caieiras – Composição Mínima</b>	<b>RR</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (% molar)</b>	<b>Demanda total energética (kW)/Vazão de CH<sub>4</sub> (kmol/h)</b>
BA <sub>T</sub> Aprimorado	1,75	4797,5	90,43%	4,30
BMin Aprimorado	2,5	4797,5	90,06%	6,62

As melhores condições encontradas na região de estudo para o cenário do aterro de Caieiras-SP foram as de RR equivalente a 1,75 e pressão de 4797,5 kPa. Nesta conjuntura, obtém-se uma vazão de metano igual a 585,9 kgmol/h, além de menores relações de energia por vazão de metano: 0,97 kW/kgmol/h para a razão de energia do *reboiler*/vazão de metano; 3,33 kW/kgmol/h para a razão de energia do condensador/vazão de metano e 4,30 kW/kgmol/h para a razão de energia total/vazão de metano.

Já para o cenário do biogás com composição mínima de metano não foi possível encontrar condições que proporcionassem resultados mais favoráveis, sendo o melhor caso o ponto selecionado na primeira etapa da análise de sensibilidade. Com os valores de RR e pressão iguais a 2,5 e 4797,5 kPa, respectivamente, obtém-se uma vazão de metano correspondente à 446,79 kgmol/h, além de menores relações de energia por vazão de metano: 1,61 kW/kgmol/h para a razão de energia do *reboiler*/vazão de metano; 5,01 kW/kgmol/h para a razão de energia do condensador/vazão de metano e 6,62 kW/kgmol/h para a razão de energia total/vazão de metano.

Com esses resultados, foi possível realizar as simulações considerando as condições de operação que geram maior eficiência para as plantas em cada caso. Somado a isso, deu-se prosseguimento à simulação das plantas de utilidades correspondentes e à avaliação dos ecoindicadores selecionados.

### 5.3 SIMULAÇÕES NAS CONDIÇÕES APRIMORADAS

Para fins de comparação, as simulações do processo considerando os cenários que utilizam como precursores o biogás proveniente do aterro de Caieiras e o de composição mínima de metano foram realizadas nas condições selecionadas a partir da análise de sensibilidade. Os resultados são apresentados e discutidos nesta seção.

### 5.3.1 Cenário do biogás - Aterro em Caieiras-SP

As seguintes simulações foram desenvolvidas considerando a composição do biogás proveniente do aterro de Caieiras, de acordo com as condições apresentadas na Tabela 5.6. Os resultados são evidenciados e comparados aos valores obtidos por Hashemi *et al.* (2019) e ao processo em condições não aprimoradas na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7** – Resultados da simulação para o cenário de Caieiras-SP aprimorado.

Corrente		Vazão (kmol/h)	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	XCH <sub>4</sub>	XCO <sub>2</sub>
BIOGAS	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	100,0	0,600	0,399
	Hysys v2.2	1000,00	35,00	100,0	0,588	0,412
	Hysys v2.2 Aprimorado	1000,00	35,00	100,0	0,588	0,412
S101	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	5050,0	0,600	0,399
	Hysys v2.2	1000,00	37,00	5050,0	0,588	0,412
	Hysys v2.2 Aprimorado	1000,00	37,00	4797,5	0,588	0,412
S103	Hashemi et al (2019)	659,50	-70,30	5050,0	0,908	0,092
	Hysys v2.2	659,48	-67,69	5050,0	0,892	0,108
	Hysys v2.2 Aprimorado	648,46	-70,35	4797,5	0,904	0,096
S104	Hashemi et al (2019)	340,50	13,80	5050,0	0,004	0,994
	Hysys v2.2	340,52	14,50	5050,0	0,000	1000
	Hysys v2.2 Aprimorado	351,54	11,10	4797,5	0,006	0,994
S106	Hashemi et al (2019)	598,60	-87,70	3950,0	1000	0,000
	Hysys v2.2	598,59	-85,96	3950,0	0,983	0,017
	Hysys v2.2 Aprimorado	585,78	-87,82	3950,0	1000	0,000

**Tabela 5.7** – Resultados da simulação para o cenário de Caieiras-SP aprimorado (continuação).

	<b>Corrente</b>	<b>Vazão (kmol/h)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pressão (kPa)</b>	<b>XCH<sub>4</sub></b>	<b>XCO<sub>2</sub></b>
S107	Hashemi et al (2019)	60,90	4,10	3950,0	0,003	0,996
	Hysys v2.2	60,89	4,72	3950,0	0,000	1000
	Hysys v2.2 Aprimorado	62,68	3,79	3950,0	0,004	0,996
LBM	Hashemi et al (2019)	598,60	-161,40	100,0	1000	0,000
	Hysys v2.2	598,59	-161,30	100,0	0,983	0,017
	Hysys v2.2 Aprimorado	585,78	-161,33	100,0	1000	0,000
LCO <sub>2</sub>	Hashemi et al (2019)	401,40	12,70	5050,0	0,003	0,994
	Hysys v2.2	401,41	13,43	5050,0	0,000	1000
	Hysys v2.2 Aprimorado	414,22	10,28	4797,5	0,006	0,994

Os dados apresentados na Tabela 5.7 demonstram que, quando comparado ao trabalho de referência, os desvios nas condições de cada corrente foram mínimos, incluindo os valores de vazão molar. Apesar do biogás proveniente do aterro em São Paulo apresentar uma composição próxima ao do gás selecionado pelo trabalho de referência e, conseqüentemente, resultados semelhantes, é possível notar que a variação da pressão e da razão de refluxo propostas por Hashemi *et al.* (2019) resulta em uma corrente de LBM com composição superior de CH<sub>4</sub> para o caso estudado.

Somado a isso, as alterações propostas também apresentaram impactos no gasto energético associado à operação dos equipamentos presentes nas plantas de processo, visto que esse parâmetro foi levado em consideração durante a análise de sensibilidade para a seleção das condições de operação. Conseqüentemente, são esperados melhores valores de consumo de água, emissão de CO<sub>2</sub> e custo de utilidades, resultados que serão abordados nas seções 5.4, 5.5 e 5.6.

### 5.3.2 Cenário do biogás - composição mínima de metano

As seguintes simulações foram desenvolvidas considerando a composição do biogás com composição mínima de CH<sub>4</sub>, de acordo com as condições apresentadas na Tabela 5.6. Os resultados são evidenciados e comparados aos valores obtidos por Hashemi *et al.* (2019) e ao processo em condições não aprimoradas na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8** – Resultados da simulação para o cenário aprimorado de biogás com composição mínima.

Corrente		Vazão (kmol/h)	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	XCH <sub>4</sub>	XCO <sub>2</sub>
BIOGAS	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	100,0	0,600	0,399
	Hysys v2.2	1000,00	35,00	100,0	0,450	0,550
	Hysys v2.2 Aprimorado	1000,00	35,00	100,0	0,450	0,550
S101	Hashemi et al (2019)	1000,00	35,00	5050,0	0,600	0,399
	Hysys v2.2	1000,00	37,00	5050,0	0,450	0,550
	Hysys v2.2 Aprimorado	1000,00	37,00	4797,5	0,450	0,550
S103	Hashemi et al (2019)	659,50	-70,30	5050,0	0,908	0,092
	Hysys v2.2	659,50	-35,71	5050,0	0,682	0,318
	Hysys v2.2 Aprimorado	496,58	-69,69	4797,5	0,900	0,100
S104	Hashemi et al (2019)	340,50	13,80	5050,0	0,004	0,994
	Hysys v2.2	340,50	14,51	5050,0	0,000	1000
	Hysys v2.2 Aprimorado	503,42	11,10	4797,5	0,006	0,994
S106	Hashemi et al (2019)	598,60	-87,70	3950,0	1000	0,000
	Hysys v2.2	598,60	-47,69	3950,0	0,752	0,248
	Hysys v2.2 Aprimorado	446,68	-87,82	3950,0	1000	0,000

**Tabela 5.8** – Resultados da simulação para o cenário aprimorado de biogás com composição mínima (continuação).

Corrente		Vazão (kmol/h)	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	XCH <sub>4</sub>	XCO <sub>2</sub>
S107	Hashemi et al (2019)	60,90	4,10	3950,0	0,003	0,996
	Hysys v2.2	60,90	4,72	3950,0	0,000	1000
	Hysys v2.2 Aprimorado	49,90	3,79	3950,0	0,004	0,996
LBM	Hashemi et al (2019)	598,60	-161,40	100,0	1000	0,000
	Hysys v2.2	598,60	-160,72	100,0	0,752	0,248
	Hysys v2.2 Aprimorado	446,68	-161,33	100,0	1000	0,000
LCO <sub>2</sub>	Hashemi et al (2019)	401,40	12,70	5050,0	0,003	0,994
	Hysys v2.2	401,40	13,43	5050,0	0,000	1000
	Hysys v2.2 Aprimorado	553,32	10,61	4797,5	0,006	0,994

Os dados apresentados na Tabela 5.8 demonstram que, quando comparado ao trabalho de referência, os desvios nas condições de cada corrente foram moderados. Nesse caso, diferentemente do anterior, nota-se que a modificação das condições de razão de refluxo e pressão de operação resulta na variação significativa da composição do gás produzido no topo das colunas.

Quando a simulação é realizada nas condições propostas por Hashemi *et al.* (2019), ao fim do processo obtém-se um gás que não atinge as especificações necessárias para a caracterização como biometano, com composição de CH<sub>4</sub> (75,2%) inferior ao exigido pela norma ANP nº 685/2017. As modificações propostas a partir da análise de sensibilidade permitem a produção de uma corrente de biometano logo na primeira coluna criogênica, com produção final de um gás com condições correspondentes às apresentadas no trabalho de referência.

Somado a isso, analogamente ao cenário anterior, as novas condições resultaram em diferentes valores de energia para os equipamentos e, por conseguinte, em alterações no

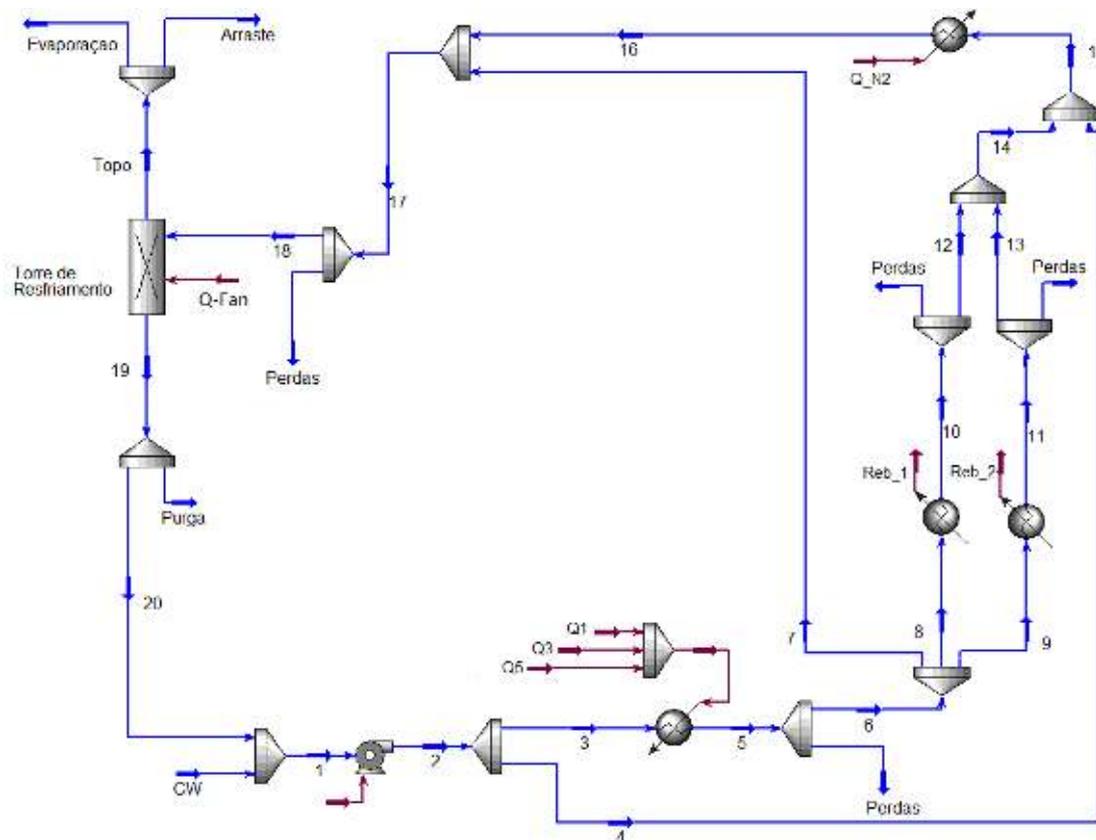
consumo de água, emissão de CO<sub>2</sub> e custo com utilidades, resultados que serão abordados nas seções 5.4, 5.5 e 5.6.

#### 5.4 PLANTA DE UTILIDADES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos através da planta de utilidades simulada de acordo com a metodologia descrita no item 4.4. Para todos os cenários propostos utilizou-se da mesma configuração, somente com alterações dos valores de energia associados aos equipamentos presentes na planta de destilação do biogás.

As correntes Q1, Q3 e Q5 correspondem à troca térmica realizada entre os equipamentos presentes na seção de compressão, que antecede às colunas criogênicas. As energias dos *reboilers* de cada coluna de destilação são avaliadas através das correntes Reb\_1 e Reb\_2. De modo similar, a energia trocada no ciclo de nitrogênio, referente ao resfriamento do gás promovido pela água, é considerada pela corrente Q\_N2. A Figura 5.5 ilustra o fluxograma de simulação da planta de utilidades.

**Figura 5.5** - Simulação da planta de utilidades.



Fonte: Autoria própria.

A simulação apresentada permitiu determinar o consumo de água para cada cenário, assim como o de energia elétrica para a bomba e ventiladores da torre de resfriamento. Somado a isso, foi possível avaliar a quantidade de energia referente às trocas térmicas realizadas nos *reboilers* e trocadores de calor. Esses resultados são listados na Tabela 5.9.

**Tabela 5.9** - Resultados da planta de utilidades para os cenários propostos.

<b>Processo</b>	<b>BPR</b>	<b>BA<sub>T</sub></b>	<b>BA<sub>T</sub> Aprimorado</b>	<b>BMin</b>	<b>BMin Aprimorado</b>
Trocadores de calor (GJ/h)	95,04	111,21	90,14	247,58	86,81
<i>Reboilers</i> (GJ/h)	8,46	12,88	6,43	44,65	5,94
Eletricidade (GJ/h)	0,98	1,11	0,93	2,42	0,89
<b>Consumo de energia (GJ/h)</b>	<b>104,48</b>	<b>125,2</b>	<b>97,5</b>	<b>294,65</b>	<b>93,64</b>
Perdas (m <sup>3</sup> /h)	114,05	138,52	85,03	512,35	68,32
Purga na torre de resfriamento (m <sup>3</sup> /h)	39,51	44,58	38,13	92,60	36,83
Perdas por arraste e evaporação (m <sup>3</sup> /h)	40,73	45,96	39,30	95,47	37,98
<b>Consumo de água (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>194,29</b>	<b>229,06</b>	<b>162,46</b>	<b>700,42</b>	<b>143,13</b>

Os resultados obtidos estão de acordo com as conclusões preliminares citadas anteriormente: conforme esperado, as propostas de aprimoramento foram capazes de reduzir os consumos de água e energia em relação aos casos simulados nas condições de referência.

## 5.5 ECOINDICADORES

Nesta seção, os ecoindicadores foram determinados de acordo com a metodologia descrita no item 4.6, utilizando-se os dados obtidos através das simulações dos processos e suas respectivas plantas de utilidades. Os principais resultados de energia retirados das plantas de biogás e utilidades, para cada cenário, assim como as taxas de produção empregadas para o cálculo dos indicadores são apresentados na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10** - Resumo dos valores de energia por equipamentos.

Equipamentos	Processo				
	BPR	BA <sub>T</sub>	BA <sub>T</sub> Aprimorado	BMin	BMin Aprimorado
Bombas (GJ/h)	0,782	0,887	0,742	1,957	0,709
Compressores (GJ/h)	72,76	84,30	69,70	187,66	67,33
Torre de resfriamento (GJ/h)	0,197	0,222	0,190	0,462	0,184
Taxa de produção (ton/h)	27,23	27,56	27,56	31,43	31,42

Os resultados dos indicadores WC, CDE e CEU são listados na Tabela 5.11, calculados conforme os fatores e as Equações 4.1, 4.2 e 4.3, apresentadas no Capítulo 4.

**Tabela 5.11** – Resultados dos ecoindicadores.

Processo	BPR	BA <sub>T</sub>	BA <sub>T</sub> Aprimorado	BMin	BMin Aprimorado
WC (m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/t)	7,14	8,31	5,89	22,29	4,55
CDE (tCO <sub>2</sub> /t)	0,07	0,08	0,07	0,16	0,06
CEU (US\$/t)	51,08	58,46	48,29	114,43	40,89

Os indicadores de emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de água e custo específico de utilidades apresentaram variações entre cada cenário, devido às diversas condições de operação adotadas. Este fato é esperado, visto que os ecoindicadores são resultados diretos do consumo total de energia pelos equipamentos e das taxas de transferência de calor via água de resfriamento na planta de utilidades.

É possível notar, através dos resultados apresentados, que os valores obtidos para os cenários do artigo de referência e do aterro de Caieiras foram relativamente próximos, o que pode ser associado à variação mínima da composição do biogás utilizado como alimentação para o processo nesses casos. Ainda assim, para o caso do aterro de Caieiras observa-se que foi possível reduzir os valores dos ecoindicadores significativamente através da adoção dos pontos selecionados, via análise de sensibilidade.

Para os cenários desfavoráveis, que consideram o biogás com composição mínima de metano, observa-se que a variação dos valores calculados para os ecoindicadores foi expressiva. A alteração considerável na composição do biogás utilizado exige condições de operação aprimoradas para que o processo permaneça viável e o produto obtido esteja de acordo com as especificações impostas. Através das modificações propostas para a razão de refluxo e pressão de operação da primeira coluna de destilação, obteve-se a redução em 79,59% e 64,27% dos indicadores de consumo de água e custo com utilidades, respectivamente.

Somado a isso, é importante ressaltar que todos os indicadores calculados para os cenários aprimorados apresentaram melhores resultados quando comparados às condições anteriores e ao processo de referência. Esse fato já era esperado e demonstra um bom resultado, comprovando a relevância da análise de sensibilidade realizada.

## 5.6 AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA – ICE

Na seção anterior, foram apresentados os valores obtidos para os ecoindicadores estudados. Utilizando-se a metodologia do Índice Comparativo de Ecoeficiência (ICE), realizou-se a normalização desses resultados, assim como a construção dos gráficos de radar para cada cenário proposto. Os valores normalizados para cada caso são listados na Tabela 5.12, onde os indicadores mais elevados são destacados em negrito.

**Tabela 5.12** – Resultados obtidos para os ecoindicadores normalizados.

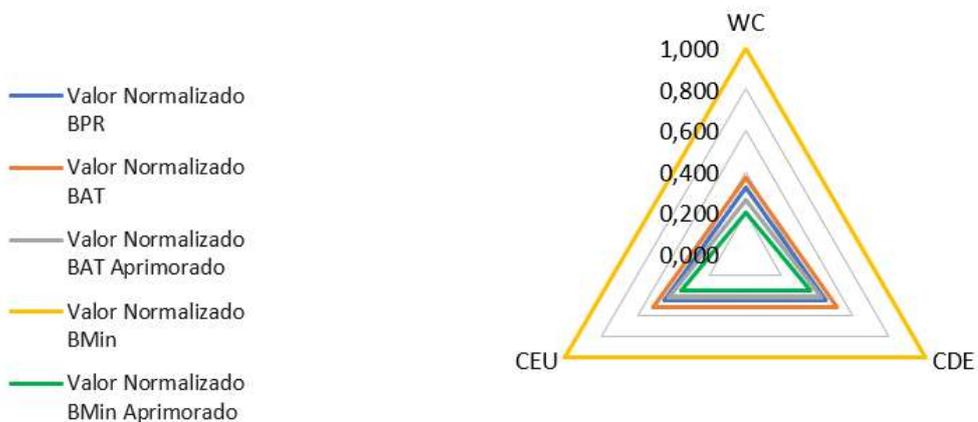
Processo	BPR	BA <sub>T</sub>	BA <sub>T</sub> Aprimorado	BMin	BMin Aprimorado
WC (m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/t)	0,320	0,373	0,264	<b>1,000</b>	0,204
CDE (tCO <sub>2</sub> /t)	0,448	0,512	0,424	<b>1,000</b>	0,359
CEU (US\$/t)	0,446	0,511	0,422	<b>1,000</b>	0,357

Conforme discutido no Capítulo 4, valores normalizados próximos de 0 correspondem aos melhores resultados enquanto os próximos de 1 compreendem as piores alternativas para a ecoeficiência. Dessa forma, é possível observar que o cenário alimentado pelo biogás com composição mínima de metano nas condições do artigo de referência (BMin) apresentou os

piores resultados em todos os indicadores, enquanto sua versão aprimorada exibiu os valores mais favoráveis, superando o cenário do aterro de Caieiras, também aprimorado. Isto ocorre, provavelmente, por conta das alterações nas vazões das correntes que seguem para aquecimento e resfriamento durante o processo.

Os resultados para cada métrica considerada neste trabalho são visualizados mais claramente nos gráficos de radar apresentados na Figura 5.6.

**Figura 5.6** – Gráficos de radar do Índice Comparativo de Ecoeficiência.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida, utilizando-se os resultados normalizados dos indicadores, foi possível calcular as áreas correspondentes aos gráficos de radar, obtendo-se um valor para o ICE de cada configuração. Esses resultados são apresentados na Tabela 5.13.

**Tabela 5.13** – Resultados obtidos para a comparação da ecoeficiência entre os cenários.

Processo	BPR	BA <sub>T</sub>	BA <sub>T</sub> Aprimorado	BMin	BMin Aprimorado
Área do Gráfico	0,210	0,279	0,174	1,299	0,119
ICE	83,80%	78,56%	86,58%	0,00%	90,85%

Assim, de acordo com os dados obtidos, é possível observar que o cenário do artigo, apesar de possuir a maior fração molar de metano em sua corrente de entrada, não possui a menor área do gráfico, ou seja, não apresenta condições de maior eficiência. Seguindo com a análise dos resultados, é possível notar o mesmo padrão avaliado para os ecoindicadores, de

modo que foram obtidos valores melhores para o cenário aprimorado de biogás com composição mínima, seguido do cenário aprimorado de Caieiras.

Novamente, fica claro que os dados associados aos casos aprimorados são mais favoráveis, evidenciando a importância da análise de sensibilidade para a determinação das melhores condições de operação da coluna no que diz respeito à razão de refluxo e pressão. Essa investigação é de extrema importância, visto que a composição da corrente de entrada de biogás pode oscilar consideravelmente dependendo dos rejeitos, tempo de digestão, métodos e tecnologias empregados, entre outros fatores. Dessa forma, é importante ressaltar que os cenários aprimorados propostos pelo presente trabalho possuem um ganho considerável em ecoeficiência com relação aos processos simulados nas condições do artigo base.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÃO**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir da avaliação da ecoeficiência do processo de beneficiamento do biogás para diversos cenários de composição, além de recomendações para trabalhos futuros.

#### **6.1 CONCLUSÕES**

Para a realização do presente trabalho, consideraram-se três cenários de composição de biogás para a produção de biometano visando o estudo comparativo de suas ecoeficiências. As simulações foram realizadas nas condições propostas pelo trabalho de Hashemi *et al.* (2019), assim como de acordo com os resultados obtidos através da análise de sensibilidade, que propôs valores de razão de refluxo e pressão de operação para a primeira coluna de destilação, visando melhor eficiência do processo. As condições selecionadas foram de RR 1,75 e 2,5, com pressões de 4797,5 kPa, para os cenários BA<sub>T</sub> aprimorado e BMin aprimorado, respectivamente.

A validação dos resultados foi efetuada através da comparação com os dados apresentados pelo artigo de referência, objetivando-se desvios de até 10,00%. As maiores divergências encontradas foram justificadas pelo fato de serem calculadas com valores absolutos pequenos frente às variações, pelas diferenças entre as versões dos simuladores e adaptações necessárias devido às restrições do software Hysys 2.2<sup>®</sup>.

Após a validação da simulação e a modificação das condições de operação, foi possível observar a redução dos valores de energia referentes à operação da planta de utilidades, assim como a diminuição da vazão de água necessária para os processos de aquecimento e resfriamento de cada caso. Os resultados apontam reduções de 22,12% e 68,22% para os valores

de energia, e de 29,08% e 79,57% para o consumo de água, considerando os cenários BA<sub>T</sub> aprimorado e BMin aprimorado, respectivamente.

Somado a isso, as alterações resultaram no aumento da concentração de CH<sub>4</sub> no produto obtido ao fim do processo, possibilitando a caracterização do mesmo como biometano. Esse efeito foi observado de maneira mais expressiva para o caso que considera o biogás de composição mínima de CH<sub>4</sub> como precursor, que quando simulado nas condições do artigo resultou em um produto que não atingiu as especificações necessárias para a caracterização e comercialização.

A análise do desempenho ambiental e econômico dos cenários foi realizada por meio da metodologia do Índice Comparativo de Ecoeficiência, levando em consideração os três ecoindicadores propostos. As novas condições resultaram em alterações no consumo de água, emissão de CO<sub>2</sub> e custo com utilidades. Os resultados demonstraram que através das modificações propostas, obtiveram-se reduções de até 79,59%, 64,27% e 62,50% dos indicadores de consumo de água, custo e emissão de CO<sub>2</sub>, respectivamente, para o cenário que considera o biogás de composição mínima de CH<sub>4</sub>.

A investigação realizada permitiu a avaliação comparativa do processo para os casos considerados, o que apresenta grande relevância, visto que a composição da corrente de entrada desse gás pode oscilar consideravelmente dependendo dos rejeitos, tempo de digestão, tecnologias e métodos empregados, entre outros fatores. Dessa forma, foi possível observar que os cenários aprimorados possuem um ganho considerável em ecoeficiência com relação aos processos simulados nas condições do artigo base, atingindo-se valores de ICE de 86,58% e 90,85% para os casos BA<sub>T</sub> aprimorado e BMin aprimorado, respectivamente.

Dessa forma, ao desenvolver processos que utilizam fontes renováveis como matéria-prima e que buscam reduzir os impactos ambientais ao longo do processo de produção, contribui-se para a construção de um planeta mais sustentável, que caminha de acordo com as ODS recomendadas pela ONU.

## **6.2 RECOMENDAÇÕES**

Para trabalhos futuros relacionados à ecoeficiência do processo de produção de biometano por criogenia, podem ser recomendadas as seguintes linhas de estudo:

- CAPEX e OPEX da planta proposta, a fim de fazer um estudo detalhado da viabilidade econômica.
- Realizar um estudo acerca de outras plantas de biogás como, por exemplo, de queima direta e de produção de hidrogênio por meio da reforma a vapor, comparando os resultados com os indicadores do presente trabalho e avaliando o melhor custo-benefício.
- Avaliação de mais indicadores ambientais, de segurança e econômicos além dos que foram desenvolvidos neste trabalho, de maneira a expandir a análise de ecoeficiência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, p. 2-4, 2010.

ABRELPE - Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais. *Panorama de 2021*. 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ABRELPE - Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. 2017. Disponível em: <[https://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama\\_abrelpe\\_2017.pdf](https://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf)>. Acesso em: 05 dez. 2021.

ALLEGUE, L. B.; HINGE, J. *Biogas upgrading – Evaluation of methods for H<sub>2</sub>S removal*. **Danish Technological Institute**, 31p., December, 2014.

ALVES, J. E. D. *Crescimento demoeconômico e emergência climática*. 2019. Disponível em: <<https://projetocolabora.com.br/ods13/crescimento-demoeconomico-e-a-emergencia-climatica/>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

AMARAL, E. C. do. *Desenvolvimento e Avaliação de um Filtro para Remoção de Umidade do Biogás*. 2019. 32 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva de Biogás, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **ANP N°685/2017**: Regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto ... Rio de Janeiro, 2017.

BARROSO, R. S.; FERREIRA, T. R. *Análise e estima de custos em processos de lavagem de gás de síntese*. 2015. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

BAUER, F.; HULTEBERG, C.; PERSSON, T.; TAMM, D. *Biogas upgrading – Review of commercial technologies*. Estocolmo: **Swedish Gas Technology Centre**, 2013. 84 p.

BECHER, U. **Biometano como combustível veicular**. Brasília: Probiogás, 2016. 76 p.

BEGAZO, C. D. T. *Avaliação de um ciclo de liquefação usando a tecnologia de refrigerante misto para plantas de pequena escala de GNL*. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. Da. *Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais*. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2014. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2014/papers/mapeamento-tecnologico-para-purificacao-de-biogas-e-seu-aproveitamento--panorama-mundial-e-iniciativas-nacionais>>. Acesso em: 16 dez. 2021.

BOYD, B. *Guidelines for Estimating Unmetered Industrial Water Use*. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2011, 33 p.

BP ENERGY. *BP Statistical Review of World Energy June 2015*. 64. ed. Londres: **Bp P.L.C.**, 2015. 48 p.

CANDIANI, G.; TORRES, D. C. “Análise qualitativa e quantitativa da produção de biogás em aterro sanitário”. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, Aquidabã, v. 6, n. 1, p. 285-292, 2014.

CANEVER, V. *Estudo de filtragem de biogás para fins energéticos utilizando como método de filtragem lavador de gases de baixo custo*. 2017. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

CAXIANO, I. N. *Intensificação e avaliação da ecoeficiência do processo de purificação de ácido acético*. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

CCE - Centro para Conservação de Energia. *Guia Técnico do Biogás*. Ed. JE92 Projectos de Marketing Ltda, Algés, Junho, 2000.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Biogás*. 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>>. Acesso em: 01 out. 2021.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás. Nota Técnica: N° 002/2010 – Panorama do Biogás no Brasil em 2019. Foz do Iguaçu, Abril de 2020.

CLIMATE WATCH. *Historical Green House Gas Emissions*. Disponível em: <[https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=area&end\\_year=2018&gases=co2%2Cch4@ions=BR&§ors=agriculture%2Cenergy%2Cwaste%2Cother&source=PIK&start\\_year=1850:](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=area&end_year=2018&gases=co2%2Cch4@ions=BR&§ors=agriculture%2Cenergy%2Cwaste%2Cother&source=PIK&start_year=1850:)>. Acesso em: 19 ago. 2021

COELHO, J. M. *Impactos da Participação do Biogás e do Biometano na Matriz Brasileira*. 2017. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE\\_IV%20FORUM%20BIOGAS\\_JOSE%20MAURO\\_2017\\_1710.pdf#search=Matriz%20energ%C3%A9tica](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS_JOSE%20MAURO_2017_1710.pdf#search=Matriz%20energ%C3%A9tica)>. Acesso em: 09 out. 2021.

COUPER, J. R.; PENNEY, W. R.; FAIR, J. R.; WALAS, S. M. *Chemical Process Equipment: Selection and Design*; **Butterworth-Heinemann**. 3.ed. 2012.

DOUROGÁS GNV. *Perguntas Frequentes*. 2021. Disponível em: <<https://www.dourogasgnv.pt/perguntas-frequentes/>>. Acesso em: 11 dez. 2021.

EIA - United States Energy Information Administration. *Henry Hub Natural Gas Spot Price*. 2021. Disponível em: <<https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdA.htm>>. Acesso em: 30 dez. 2021.

ENGIE. *Conheça as tendências para a matriz energética do Brasil*. 2016. Disponível em: <<https://blog-solucoes.engie.com.br/energia-solar/tendencias-matriz-energetica/>>. Acesso em: 18 set. 2021.

EPE - Empresa De Pesquisa Energética. *Matriz Energética e Elétrica*. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 21 nov. 2021.

FGV - Fundação Getúlio Vargas. *Dados - Matriz Energética*. 2020. Disponível em: <<https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>>. Acesso em: 01 out. 2021.

FRARE, L. M.; VIEIRA, M. G. A.; SILVA, M. G. C.; PEREIRA, N. C.; GIMENES, M. L. "Hydrogen sulfide removal from biogas using Fe/EDTA solution: Gas/Liquid contacting and sulfur formation". *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 29, n.1, p.34-41, 2010.

FREDDO, A.; MARTINEZ, D.G. *Tecnologias de dessulfurização do biogás*. Foz do Iguaçu: **CIBIOGAS**, 2019. 34 p.

GOLDEMBERG, J. "Biomassa e energia". *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009.

HASHEMI, S. E.; SARKER, S.; LIEN, K. M.; SCHNELL, S. K.; AUSTBØ, B. "Cryogenic vs. absorption biogas upgrading in liquefied biomethane production – An energy efficiency analysis". *Fuel*, v. 245, p. 294-304, 2019.

HORIKAWA, M. S.; ROSSI, F.; GIMENES, M. L.; COSTA, C. M. M.; SILVA, M. G. C. da. "Chemical absorption of H<sub>2</sub>S for biogas purification". *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 21, No . 03, p.415 - 422, 2004.

ICLEI - Governos Locais Pela Sustentabilidade. *Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários*. São Paulo: **ICLEI**, 2009. 80 p.

JENDE, O.; PLATZER, C.; CABRAL C. B. G.; HOFFMANN, H.; ROSENFELDT, S.; COLTURATO, L. F. D. B.; BURKARD, T.; LINNENBERG, C.; STINNER, W.; ZORNER, F.; SCHRODER, E. S. *Biogás: Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás*. 2015. ProBiogás. Disponível em: <<https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-tecnologias-biogas.pdf>>. Acesso em: 03 dez.2021.

KRONOS. Hydrogen sulfide elimination from biogas. Technical Information 5.01, 4p, 2014.

LANGÈ, S.; PELLEGRINI, L. A.; VERGANI, P.; LOSAVIO, M. "Energy and Economic Analysis of a New Low-Temperature Distillation Process for the Upgrading of High-CO<sub>2</sub>

Content Natural Gas Streams”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 54, n. 40, p. 9770-9782, 2015.

LAROVERE, E. L. O. *Brasil e a COP-21*. Disponível em: <<http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/index.php/br/destaque/noticias/2-o-resultado-da-cop-21>>. Acesso em: 21 nov. 2021.

LASSU - Laboratório De Sustentabilidade Da Universidade De São Paulo. *Pilares da Sustentabilidade*. Disponível em: <[http://www.lassu.usp.br/sustentabilidade/pilares-da-sustentabilidade/?doing\\_wp\\_cron=1637427081.1526210308074951171875](http://www.lassu.usp.br/sustentabilidade/pilares-da-sustentabilidade/?doing_wp_cron=1637427081.1526210308074951171875)>. Acesso em: 25 out. 2021.

LIMA, L. C. A.; GONÇALVES, P. C. *Desafios do desenvolvimento sustentável: estudo sobre as mudanças na matriz energética brasileira*. 2016. 134 f. TCC - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Fator médio - Inventários corporativos. 2021*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>. Acesso em: 31 dez. 2021.

MDR - Ministério do Desenvolvimento Regional. *Resíduos sólidos: maior aterro sanitário do Brasil é visitado pelo Governo Federal*. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/residuos-solidos-maior-aterro-sanitario-do-brasil-e-visitado-pelo-governo-federal>>. Acesso em: 15 jun. 2021.

MIAO, X.; MA, Y.; CHEN, Z.; GONG, H. “Oxidative degradation stability and hydrogen sulfide removal performance of dual-ligand iron chelate of Fe-EDTA/CA”. *Environmental Technology*, v.23, p.3006-3012, 2018.

MPGO - Ministério Público do Estado de Goiás. *Resíduos Sólidos Urbanos*. Disponível em: <<http://www.mpggo.mp.br/portal/noticia/residuos-solidos-urbanos#.YCIpGhKhPY>>. Acesso em: 04 dez. 2021.

NASCIMENTO, M. C. B., FREIRE, E. P., DANTAS, F. de A. S., GIANSANTE, M. B. “Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil”. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 24, p. 143-155. 2019

ONU - Organização Das Nações Unidas. *17 Sustainable Development Goals (SDGs)*. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/goals>>. Acesso em: 08 jul. 2021.

PALERMO, G. C.; GOMES, A. P. P. *Tratamento e Gestão de Resíduos*. Rio de Janeiro: **Uva**, 2017. 156p.

PARKIN, G. F.; OWEN, W. F. “Fundamentals of anaerobic digestion”. *Journal of Environmental Engineering*. v. 112, p. 867-920. 1986.

PEREIRA, C. P.; PAES, D. P.; PRATA, D. M.; MONTEIRO, L. P. C. “Desenvolvimento de Índice de Comparação de Ecoeficiência a partir de Ecoindicadores”. *Sistemas & Gestão*, Niterói, v. 9, n. 2, p. 168-180, 2014.

PEREIRA, C P.; PRATA, D. M.; SANTOS, L. S.; MONTEIRO, L. P. C. “Development of eco-efficiency comparison index through ecoindicators for industrial applications”. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 35, n. 1, p. 69-89, 2018.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A. de; ROALCABA, O. D. C. (2016). “Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb)”. *Revista Brasileira De Estudos De População*, 33(1), 175–188. <https://doi.org/10.20947/S0102-309820160009>

POBLETE, I. B. de S. *Simulação e análise de produção e condicionamento de biogás*. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

PORTAL DO BIOGÁS. *Biodigestão Anaeróbia*. 2021a. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/biodigestao-anaerobia/>>. Acesso em: 21 out. 2021.

PORTAL DO BIOGÁS. *Formas de uso do biogás*. 2021b. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/formas-de-uso-do-biogas/>>. Acesso em: 24 out. 2021.

PPGB-UFPR - Programa de Pós-Graduação em Bioenergia da Universidade Federal do Paraná. *Um estudo sobre o Biogás*. 2018. Disponível em: <[http://www.palotina.ufpr.br/portal/bioenergia/wp-content/uploads/sites/5/2018/05/Apresenta%C3%A7ao\\_Biogas\\_Palotina-C%C3%B3pia.pdf](http://www.palotina.ufpr.br/portal/bioenergia/wp-content/uploads/sites/5/2018/05/Apresenta%C3%A7ao_Biogas_Palotina-C%C3%B3pia.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2021.

PROBIOGAS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. *Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização*. PROBIOGAS, 2010. Disponível em: <[http://www.resol.com.br/cartilhas/giz\\_-\\_guia\\_pratico\\_do\\_biogas\\_final.pdf](http://www.resol.com.br/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf)>. Acesso em: 21 nov. 2021.

RATTANAPAN, C.; OUNSA NEHA, W. “Removal of Hydrogen Sulfide Gas using Biofiltration – a Review”. *Walailak J Sci & Tech*, v.9, n.1, p.9-18, 2012.

REIS, F. A. G. V. *Formas de disposição de resíduos: Aterro sanitário*. 2001. Disponível em: <<https://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res13.html>>. Acesso em: 01 dez. 2021.

RUZZA, L. D. *Estudo da separação de biogás através de processos de destilação criogênica*. 2019. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. “Techniques for transformation of biogas to biomethane”. *Biomass and Bioenergy*, v.35, p.1633- 1645, 2011.

SALING, P.; KICHERER, A.; DITTRICH-KRÄMER, B.; WITTLINGER, R.; ZOMBIK, W.; SCHMIDT, I.; SCHROTT, W.; SCHMIDT, S. “Eco-efficiency analysis by BASF: the method”. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 7, n. 4, p. 203-218, 2002.

SIITONEN, S.; TUOMAALA, M.; AHTILA, P. “Variables affecting energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the steel industry”. *Energy Policy*, v. 38, p. 2477-2485, 2010.

SILLA, H. *Chemical Process Engineering - Design and Economics*. New Jersey: **Marcel Dekker, Inc.**, 2003.

SILVA, M. T. C. *Análise do balanço entre sequestro e emissão de CO<sub>2</sub> resultante do circuito de produção e consumo de biomassa florestal numa central de co-geração*. 2009. 129 f.

Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestrado em Bioenergia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

TAN, Y., WORRADA, N., LI, H., THORIN, E., YAN, J. “Cryogenic technology for biogas upgrading combined with carbon capture - a review of systems and property impacts”. *Elsevier*, v. 142, p. 3741-3746, 2017.

TAVARES, A. N.; SANTOS, G. V. dos; CARVALHO, R. de Q. *Oportunidades enterradas: geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos*. Vitória: **Edufes**, 2019. 320 p.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. “Matriz energética brasileira: uma prospectiva”. *Novos Estudos - Cebrap*, n. 79, p. 47-69, 2007.

TOLMASQUIM, M. T.; *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2021

TURTON, R.; BHATTACHARYYA, D.; WHITING, W. B.; SHAEIWITZ, J. A. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, 5 ed., 2018. 1144 p.

UNFCCC - United Nations Framework Convention On Climate Change. *Paris Agreement: Brazil's Nationally Determined Contribution (NDC)*. 2016. Disponível em: <[https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20\(Updated%20submission\).pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20(Updated%20submission).pdf)>. Acesso em: 17 set. 2021.

VILANOVA NETA, M. A. **Atlas de Saneamento 2011**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. Rio de Janeiro, 2011. cap. 9.

VUT - Vienna University of Technology. Promotion of bio-methane and its market development through local and regional partnerships. A project under the Intelligent Energy - Task 3.1.1. 15p., 2012.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development. *Measuring Eco-Efficiency: A guide to reporting company performance*. 2020. Disponível em: <<http://www.gdrc.org/sustbiz/measuring.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2021

WGC - World Gas Conference, 26th., 2015, França. “Triennial Work Programme: 2012 – 2015”. França: Wgc, 2015. 69 p. Disponível em: <[http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2015/wgc-2015/wgc-triennial-dec\\_13.pdf](http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2015/wgc-2015/wgc-triennial-dec_13.pdf)>. Acesso em: 04 set. 2021

ZANETTE, A. *Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil*. 2009. 105f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.