

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**ALEXANDRE DE SOUZA SILVA
JOÃO VÍTOR TOTA AVEZZÚ
LETÍCIA EMANUELLE DA SILVA ABREU
MARCELO TEIXEIRA
RAPHAELA GONÇALVES DE BARROS**

BioG: INDÚSTRIA DE BIOGÁS

APUCARANA

2022

ALEXANDRE DE SOUZA SILVA
JOÃO VÍTOR TOTA AVEZZÚ
LETÍCIA EMANUELLE DA SILVA ABREU
MARCELO TEIXEIRA
RAPHAELA GONÇALVES DE BARROS

BioG: INDÚSTRIA DE BIOGÁS

BioG: BIOGAS INDUSTRY

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Juliana Guerra Sgorlon

Coorientador(a): Prof.^a Dr.^a Caroline Casagrande Sipoli

APUCARANA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

BIOG: INDÚSTRIA DE BIOGÁS

Por

ALEXANDE DE SOUZA SILVA

JOÃO VÍTOR TOTA AVEZZÚ

LETÍCIA EMANUELLE DA SILVA ABREU

MARCELO TEIXEIRA

RAPHAELA GONÇALVES DE BARROS

Monografia apresentada às 15:00 horas do dia 01 de dezembro de 2022 como requisito parcial, para conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Apucarana. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Fernanda Lini Seixas	Membro
Prof. Dr. Rafael Oliveira Defendi	Membro
Profa. Dra. Juliana Guerra Sgorlon	Orientador



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **JULIANA GUERRA SGORLON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em (at) 01/12/2022, às 16:08, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **RAFAEL OLIVEIRA DEFENDI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em (at) 01/12/2022, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **FERNANDA LINI SEIXAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em (at) 01/12/2022, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site (The authenticity of this document can be checked on the website) https://sei.utfpr.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador (informing the verification code) **3151223** e o código CRC (and the CRC code) **029CEC0C**.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a elaboração teórica da BioG: Indústria de Biogás. Esta se colocará no mercado com uma usina de produção de energia elétrica por meio do biogás, resultante da digestão anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), tendo como inóculo o lodo 1º e 2º oriundo de Estações de Tratamento de Esgoto. Por meio da realização de uma análise de mercado, percebeu-se a crescente busca por dados referentes ao biogás, bem como o aumento de incentivos governamentais para o processo produtivo, cenário este relacionado à busca atual por matrizes energéticas limpas e renováveis. A BioG se posicionará como solução para problemáticas de acúmulo de resíduos em dispositivos finais de despejo, dependência de combustíveis fósseis, além de que apresentará a utilização deste gás com elevado poder calorífico para a geração de energia elétrica, sendo que se localizará na cidade de Campinas-SP. Além disso, a usina será responsável pelo reaproveitamento do digestato resultado do processo fermentativo, como biofertilizante para finalidades agrícolas. Para esta produção, escolheu-se como biorreator um sistema batelada de matéria orgânica úmida, sendo esta oriunda de 1000 toneladas mensais de RSU, com armazenamento em um gasômetro, para posteriormente seguir em um escoamento contínuo de purificação. Este processo de purificação visa a retirada de impurezas corrosivas que diminuem o potencial calorífico do biogás, com a utilização futura de um sistema de absorção física com o uso do solvente orgânico Selexol®. Assim, se terá a geração de energia elétrica por meio de uma turbina a gás, a qual operará diante da combustão deste combustível produzido. Foram dimensionados todos os equipamentos, elaborado o diagrama PFD, integração energética e o *layout* da indústria. A estimativa de produção obtida através de balanços materiais, energéticos é de 34.884 MWh/Mês de energia elétrica, energia esta suficiente para suprir uma demanda de 15% do total de energia consumida na cidade de Campinas. O empreendimento utilizou um financiamento de 20 anos do BNDS para os investimentos de equipamentos, terreno e construção da planta. A análise financeira constatou a viabilidade do projeto com uma empresa lucrativa e com *payback* de 6 anos.

Palavras-chave: Biogás; Energia elétrica; Combustível; Lodo; Digestão anaeróbia.

ABSTRACT

The present work presents the theoretical elaboration of BioG: Indústria de Biogás. This will be placed on the market with a plant for the production of electricity using biogas, resulting from the anaerobic digestion of Urban Solid Waste (MSW), using sludge 1 and 2 from Sewage Treatment Stations as inoculum. By carrying out a market analysis, it was noticed the growing search for data related to biogas, as well as the increase in government incentives for the production process, a scenario related to the current search for clean and renewable energy matrices. BioG will position itself as a solution to problems of accumulation of waste in final disposal devices, dependence on fossil fuels, in addition to presenting the use of this gas with a high calorific value to generate electricity, and will be located in the city of Campinas -SP. In addition, the plant will be responsible for reusing the digestate resulting from the fermentation process, as a biofertilizer for agricultural purposes. For this production, a batch system of wet organic matter was chosen as the bioreactor, which comes from 1000 monthly tons of MSW, with storage in a gasometer, to later follow in a continuous flow of purification. This purification process aims to remove corrosive impurities that reduce the calorific potential of the biogas, with the future use of a physical absorption system using the organic solvent Selexol®. Thus, electricity will be generated by means of a gas turbine, which will operate on the combustion of this produced fuel. All equipment was dimensioned, the PFD diagram, energy integration and the layout of the industry were prepared. The estimated production obtained through material and energy balances is 34884 MWh/month of electrical energy. The project used a 20-year loan from the BNDS for investments in equipment, land and construction of the plant. The financial analysis verified the viability of the project with a profitable company and a 6-year payback.

Keywords: Biogas; Eletric energy; Fuel; Anaerobic digestion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Logomarca da BioG	18
Figura 2 - Organograma da indústria de biogás BioG	20
Figura 3 - Número anual de artigos publicados no “Scopus” e “Web of Science”, baseado na palavra-chave “biogas”	23
Figura 4 - Localização das Plantas de Biogás	24
Figura 5 - Total de energia produzida pelo Brasil por tipo de combustível no ano de 2019.....	25
Figura 6 - Consumo de Energia Elétrica total em Campinas (MWh).....	26
Figura 7 - Mapa da Região Metropolitana de Campinas	28
Figura 8 - Localização da BioG	29
Figura 9 - Fluxograma do processo para a obtenção do biogás e energia elétrica.....	32
Figura 10 - Sequência metabólica do processo de digestão anaeróbia.....	37
Figura 11 - Biodigestor do tipo batelada.....	40
Figura 12 – Gasômetro de lona utilizado para armazenamento de biogás	41
Figura 13 – Fluxograma do processo de purificação do biogás.....	44
Figura 14 - Detalhes de uma turbina a gás.....	45
Figura 15 - Funcionamento de uma turbina a gás com regenerador.....	46
Figura 16 – Torre Venturi de absorção química	49
Figura 17 – Fluxograma do processo.....	52
Figura 18 - Processo geral da purificação	55
Figura 19 – Separador magnético e suas correntes	55
Figura 20 - Sistema de separação dos materiais orgânicos e suas correntes ..	57
Figura 21 – Biodigestor e suas correntes	58
Figura 22 - Processo de purificação e suas correntes	62
Figura 23 – Compressor de Gás CG-202 e suas correntes.....	64
Figura 24 - Coluna de absorção e suas correntes.....	66
Figura 25 - Vaso flash e suas correntes	67
Figura 26 – Vaso regenerador do solvente e suas correntes.....	72
Figura 27 - Processo geral da geração de energia e suas correntes	74
Figura 28 - Processo geral da geração de energia com integração energética.	76

Figura 29 – Relação entre a temperatura e a Entalpia do sistema de integração energética	78
Figura 30 - Peneira e suas correntes.....	79
Figura 31 - Decantador e suas correntes	80
Figura 32 - Separação final das frações de biofertilizantes.....	81
Figura 33 - Ilustração das dimensões do separador magnético	83
Figura 34 – Filtro separador de material particulado	86
Figura 35 – Compressor para sistema de compressão do biogás	87
Figura 36 – Vaso <i>Flash</i> para separação do gás metano	89
Figura 37 – Bomba para o solvente regenerado.....	90
Figura 38 – Gasômetro de armazenamento do biogás purificado	91
Figura 39 – Lavador de gases Venturi.....	92
Figura 40 - Gerador de energia em escala industrial	93
Figura 41 - Peneira para separação do material orgânico e inorgânico.....	94
Figura 42 - Decantador	95
Figura 43 – Filtro separador do biofertilizante sólido e líquido	96
Figura 44 – Tanque para armazenamento de biofertilizante líquido	97
Figura 45 – <i>Big Bag</i> para armazenamento de biofertilizante sólido	98
Figura 46 – Caldeira para geração de utilidade quente	100
Figura 47 - DRE.....	108
Figura 48 - <i>Payback</i>	110
Figura 49 - Ponto de equilíbrio.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reações importantes nos processos anaeróbios	39
Tabela 2 – Efluentes e seus respectivos tratamentos	47
Tabela 3 – Descrição das correntes apresentadas na Figura 17	53
Tabela 4 – Dados de densidades e massas calculadas para os gases do biogás	54
Tabela 5 – Balanço de massa da separação do material metálico	56
Tabela 6 – Balanço de massa da separação do material inorgânico.....	57
Tabela 7 – Características físico-químicas do lodo advindo de ETE.....	60
Tabela 8 – Balanço de massa e energia do biodigestor	61
Tabela 9 – Balanço de massa e energia para a água da camisa de resfriamento do biodigestor	61
Tabela 10 – Balanço de massa e energia do CG-201	63
Tabela 11 – Balanço de massa e energia do CG-202	64
Tabela 12 – Balanço de massa e energia do TC-201.....	65
Tabela 13 – Balanço de massa e energia da coluna de absorção	66
Tabela 14 – Balanço de massa e energia do vaso <i>flash</i>	68
Tabela 15 – Balanço de massa e energia do sistema de troca térmica sem integração energética	69
Tabela 16 – Balanço de massa e energia do sistema de troca térmica com integração energética	70
Tabela 17 – Balanço de massa e energia do vaso regenerador.....	72
Tabela 18 – Balanço de massa e energia da bomba hidráulica	73
Tabela 19 - Balanço de massa e de energia para a geração de energia.....	75
Tabela 20 - Balanço de massa e de energia com integração energética	77
Tabela 21 – Balanço de massa do peneiramento	79
Tabela 22 – Balanço de massa do decantador	80
Tabela 23 - Valores das correntes e frações do filtro	81
Tabela 24 - Dimensões do separador magnético	83
Tabela 25 - Dimensões moinho de rolos	84
Tabela 26 - Dimensões do sistema de filtração de água	85
Tabela 27 - Dimensionamento dos trocadores de calor do Setor 200.....	87

Tabela 28 – Dimensionamento da coluna de absorção	88
Tabela 29 – Dimensões do Lavador de gases Venturi	92
Tabela 30 - Dimensões do sistema de turbina a gás.....	93
Tabela 31 - Dimensão do decantador	96
Tabela 32 – Dimensões do Filtro Separador	97
Tabela 33 – Balanço de massa e energia da caldeira	99
Tabela 34 - Custos fixos anuais	103
Tabela 35 - Custos variáveis	104
Tabela 36 - Financiamento anual	105
Tabela 37 - Tributação e aplicação na Receita	106
Tabela 38 – Renda mensal por tributo.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GAPCR	<i>Gliding Arc Plasma Catalyst Reformer</i>
GNV	Gás Natural Veicular
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
IPTU	Imposto Predial e Territorial Urbano
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISSQN	Impostos sobre serviço de Qualquer Natureza
ITBI	Imposto sobre Transmissão de Bens e Imóveis
NBR	Normas Brasileiras
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PIB	Produto Interno Bruto
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
TMB	Tratamento Mecânico Biológico
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

H ₂ O	Água
ROH	Álcoois
CH ₃ COOH	Acetato
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
NH ₃	Amônia
atm	Atmosfera
CH ₃ CH ₂ CH ₂ COO ⁻	Butirato
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
cm ³	Centímetro cúbico
COV	Compostos orgânicos voláteis
CO ₂	Dióxido de carbono
SO ₂	Dióxido de enxofre
S	Enxofre
RCOOR	Ésteres
g	Gramas
°C	Graus Celsius
OH ⁻	Grupo hidroxila
H ₂	Hidrogênio
NaOH	Hidróxido de sódio
K	Kelvin
Kg	Quilograma
kW	Quilowatts
L	Litros
mg	Miligrama
MPa	Mega Pascal
MW	Megawatts
CH ₄	Metano
m ³	Metro cúbico
mL	Mililitros
CO	Monóxido de carbono
N ₂	Nitrogênio

NO_x	Óxidos de nitrogênio
ppm	Partes por milhão
%	Porcentagem
pH	Potencial hidrogeniônico
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^-$	Propionato
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
Na_2S	Sulfeto de sódio
t	Tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos específicos	17
3	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	18
3.1	Logomarca.....	18
3.2	Missão, visão e valores	19
3.3	Organograma	19
4	HISTÓRIA DO BIOGÁS	21
4.1	História no mundo	21
4.2	História no Brasil	21
5	ANÁLISE DE MERCADO.....	23
5.1	Cenário mundial e nacional	23
5.1.1	Demanda de mercado	24
5.1.2	Demanda em Campinas	26
5.2	Público-alvo.....	27
5.3	Local de implantação	27
5.3.1	Economia de Campinas.....	29
5.3.2	Incentivos fiscais.....	29
5.3.3	Centros de pesquisa	30
5.3.4	Abundância de matéria prima	30
6	JUSTIFICATIVA	31
7	DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	32
7.1	Transporte de matéria-prima	33
7.2	Separação do material orgânico.....	34

7.3	Fragmentação do material orgânico	35
7.4	Biodigestor	35
7.5	Gasômetro	40
7.6	Purificação.....	41
7.6.1	Remoção de umidade, gás carbônico, sulfeto de hidrogênio e siloxanos	43
7.7	Geração de energia elétrica	44
7.8	Tratamento de resíduo	47
7.8.1	Biofertilizante	47
7.8.2	Correntes gasosas de exaustão	47
8	BALANÇO MATERIAL E ENERGÉTICO COM INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA.....	51
8.1	Setor de preparação de matéria-prima	55
8.1.1	Separação da matéria-prima	55
8.2	Biodigestor	58
8.2.1	Camisa de resfriamento do biodigestor	61
8.3	Purificação.....	61
8.3.1	Compressor de gás CG-201	63
8.3.2	Compressor de gás CG-202	63
8.3.3	Trocador de calor TC-201	64
8.3.4	Coluna de absorção.....	65
8.3.5	Vaso <i>flash</i>	67
8.3.6	Sistema de integração energética	68
8.3.7	Vaso regenerador	71
8.3.8	Bomba hidráulica BH-201	73
8.4	Geração de energia.....	73
8.5	Tratamento para obtenção do biofertilizante	78

9	DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS	82
9.1	Setor 100: Obtenção do biogás	82
9.1.1	Separador magnético	82
9.1.2	Esteira de separação	83
9.1.3	Moinho de rolos	84
9.1.4	Biodigestor	84
9.1.5	Torre de resfriamento	84
9.1.6	Sistema de filtração de água	85
9.1.7	Gasômetro	85
9.2	Setor 200: Purificação do biogás	85
9.2.1	Filtro separador	85
9.2.2	Compressores	86
9.2.3	Trocadores de calor	87
9.2.4	Coluna de absorção	87
9.2.5	Vaso <i>flash</i>	88
9.2.6	Vaso regenerador	89
9.2.7	Bomba hidráulica	90
9.2.8	Gasômetro	91
9.2.9	Lavador Venturi	91
9.3	Setor 300: Geração de energia elétrica	93
9.3.1	Sistema de turbina a gás	93
9.3.2	Gerador	93
9.3.3	Trocador de calor – regenerador	94
9.4	Setor 400: Obtenção do biofertilizante	94
9.4.1	Peneira	94
9.4.2	Decantador	94

9.4.3	Filtro separador.....	96
9.4.4	Tanques de armazenamento.....	97
10	UTILIDADES	99
11	<i>PROCESS FLOW DIAGRAM (PFD)</i>	101
12	<i>LAYOUT DA INDÚSTRIA BIOG</i>	102
13	ANÁLISE FINANCEIRA	103
13.1	Custos fixos	103
13.2	Custos variáveis	104
13.3	Capital de giro	104
13.4	Financiamento.....	104
13.5	Receitas	106
13.6	Demonstrativo de Resultado de Exercício (DRE)	107
13.7	Viabilidade financeira	108
13.7.1	Taxa Interna de Retorno (TIR).....	108
13.7.2	Valor Presente Líquido e <i>Payback</i>	109
13.7.3	Ponto de equilíbrio	110
14	CONCLUSÃO.....	112
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A – Equações do balanço de massa	128
	APÊNDICE B – Descrição dos cálculos do balanço de energia e integração energética	141
	APÊNDICE C – Cálculos do dimensionamento dos equipamentos	156
	APÊNDICE D – <i>Process Flow Diagram (PFD)</i>	172
	APÊNDICE E – <i>Layout</i>	178
	APÊNDICE F – Análise financeira	181

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade como sociedade implicou na gradativa incorporação da energia e suas fontes para atividades cotidianas. Como exemplo disto pode-se citar a utilização de energia elétrica para manutenção de alimentos em refrigeradores, água aquecida, aparelhos eletrônicos. Ademais, tem-se a utilização do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), para cocção de alimentos, aerossóis, dentre outros usos da energia (NETO; CARVALHO, 2012).

De acordo com a organização *World in Data* (2020), mais de 80% da energia obtida mundialmente é oriunda de combustíveis fósseis, como petróleo cru, carvão e gás natural. Estes combustíveis têm sua composição baseada na decomposição biológica incompleta de matéria orgânica morta, sendo classificados como fontes de energia não renováveis. Desta forma, prevê-se que a extração do petróleo poderá alcançar seu pico entre os anos de 2020 e 2050, significando que a obtenção do mesmo tende a diminuir após este marco (STAFF, 2020).

O petróleo foi o combustível fóssil responsável por mais de 33% da matriz energética global no ano de 2019, dado este que explicita a hegemonia desta fonte quando comparada às demais (WORLD IN DATA, 2020). Embora as vantagens energéticas deste óleo sejam notáveis – em consequência de sua energia abundante frente ao custo apresentado, suas desvantagens são escalonadamente maiores. Desde a extração, refino e o próprio uso do combustível, impactos ambientais podem ser reconhecidos, como poluição do ar e água, chuva ácida e contribuição para o aquecimento global (NETO; CARVALHO, 2012).

Segundo Moreira (2021), o Brasil no ano de 2017 apresentou como sendo a principal fonte primária de energia, o sistema hídrico, sendo seguida pela utilização de gás natural, biomassa, eólica, além de outras matrizes em menor escala. Desta forma, constata-se que, embora significativa parcela da energia primária obtida no Brasil sejam de fontes renováveis, ainda há uma expressiva fração composta por combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão.

Tendo como base esta exposição de fatos, atualmente se faz necessária a busca por desenvolver fontes alternativas primárias de energia. Matrizes energéticas como nuclear, geotérmica, hídrica, eólica, marítima, solar e de biomassa se tornam alvos de medidas que almejam viabilizar seu processo de aplicação, a fim de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis. Dentro destas possibilidades, as fontes de

energia renováveis são atrativas pois não apresentam impactos ambientais consideráveis e seus recursos são inesgotáveis (BOTKIN; KELLER, 2009).

Um processo de aproveitamento energético com notório potencial é o que ocorre através do biogás. O biogás pode ser definido como: “Gás combustível de composição variada em que predomina o metano, obtido pela fermentação anaeróbica de material orgânico de origem animal ou vegetal, como esterco, resíduos agrícolas, dejetos, lixo etc.” (MICHAELIS, 2022). Assim, esta matriz é composta por metano (50% a 75%) e dióxido de carbono (25% a 50%), além de gases em composições minoritárias, como vapor d’água (PLUGGE, 2017).

De acordo com Neto e Carvalho (2012), esta mistura gasosa pode ser obtida através de duas metodologias: a gaseificação e a biodigestão. Esta segunda metodologia permite mitigar os efeitos adversos da disposição dos resíduos e caracteriza-se como um processo bioquímico, o qual ocorre na ausência de oxigênio molecular livre. Assim, tem-se a conversão da matéria orgânica complexa na mistura gasosa citada anteriormente, onde o efluente principal resultante pode ser utilizado como fertilizantes para solos (SILVA e TREVISAN, 2019).

Esta digestão anaeróbica, pode ser realizada em biodigestores de modelo indiano, chinês, lona ou batelada. Para a efetivação deste processo biológico, podem ser utilizados como substrato dejetos bovinos, suínos, aviários ou lodo de esgoto presente em estações de tratamento de esgoto (ETE) (BRUNO; LÓPEZ; CORONAS, 2009).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são a matéria-prima para o processo de obtenção do biogás abordado neste trabalho, sendo esta resultante tanto de atividades domésticas, como de atividades comerciais. Atualmente, estima-se que no Brasil seja produzido 1 quilograma de RSU por habitante por dia, sendo que essa geração já se assemelha com alguns países da União Europeia. A disposição sanitária destes resíduos no país não atingiu um patamar satisfatório, pois em mais da metade dos municípios brasileiros, tem-se a disposição deste material em vazadouros a céu aberto, conhecidos como “lixões” (GOUVEIA, 2020).

Diversos produtos podem ser obtidos através da utilização do biogás, como a energia elétrica em plantas com turbinas geradoras, abastecimento de meios de transportes por meio da concentração do gás. Além disso, pode-se citar a conversão do biogás em combustível de hidrogênio através do método GAPCR (*Gliding Arc*

Plasma Catalyst Reformer), o qual apresenta elevado rendimento percentual de transformação (PANWAR; KADAM, 2017).

Assim, o presente trabalho irá apresentar um estudo do mercado do biogás em âmbito nacional e internacional, além da descrição do processo de obtenção de energia elétrica através do biogás purificado, por meio do reaproveitamento da matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Ademais, será abordado como inóculo as bactérias presentes do lodo de ETE, bem como o aprofundamento nos efluentes que possuem aproveitamento como biofertilizantes e no tratamento daqueles que não possuem proveito econômico, processos estes que serão realizados na cidade de Campinas-SP.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste na elaboração de um projeto conceitual da instalação industrial de uma usina de biogás, utilizando-se a fração orgânica de resíduos sólidos com a finalidade da produção de energia elétrica. Desta forma, o presente trabalho denotará como se comporta este setor e suas projeções diante do mercado atual, a descrição das etapas envolvidas no processo, bem como realizar a análise de integração material, energética e financeira.

2.1 Objetivos específicos

Pode-se mencionar que o presente trabalho visa os seguintes requisitos:

- Apresentação da empresa e tipo de empreendimento;
- Apresentar um estudo de mercado do biogás junto com a demanda do seu consumo como energia elétrica;
- Desenvolver o fluxograma e descrição das etapas envolvidas no processo;
- Balanço de massa e energia para o processo;
- Integração energética;
- Elaborar o plano de tratamento adequado dos resíduos gerados ao longo do processo;
- Dimensionamento dos equipamentos envolvidos no processo;
- Apresentar uma análise financeira e viabilidade de aplicação dessa indústria.

3 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A BioG será uma empresa brasileira atuante na produção regional de biogás, voltada para a geração de energia elétrica. Sua sede estará localizada no município de Campinas, no estado de São Paulo, entre grandes centros industriais.

No nome BioG, a letra G remete a geração de energia gasosa sustentável, já o Bio representa que o gás é produzido por microrganismos e obtido a partir de resíduos orgânicos, além de enfatizar a principal ideia da empresa: a produção de biogás visando os mínimos impactos ao meio ambiente.

3.1 Logomarca

A Figura 1 apresenta a logomarca da empresa, nela o nome está inserido em um símbolo de meia lua, que representa o renascimento e a imortalidade, desta forma, passa-se a mensagem de que há o renascimento de uma nova opção de fonte de energia, já a imortalidade é associada a energia renovável, onde se tem a matéria-prima em larga escala, sendo essa matéria orgânica.

A coloração predominantemente utilizada é a verde, com o intuito de remeter à sustentabilidade, pois a empresa trabalhará com energia limpa e reutilização de materiais orgânicos.

Figura 1 - Logomarca da BioG



Fonte: Autoria Própria (2022)

3.2 Missão, visão e valores

A identidade organizacional da empresa é formada pelo seguinte conjunto:

Missão: A BioG tem como objetivo a geração de gás e energia elétrica de alta qualidade, tendo em vista o respeito ao meio ambiente, por meio de uma indústria sustentável, transformando resíduos orgânicos em combustíveis e energia limpa, renovável e natural.

Visão: Ser reconhecida como empresa de referência na produção de biogás, usado como combustível na geração de energia elétrica, principalmente, no mercado da região sudeste do Brasil, otimizando ao máximo cada processo. Além do reconhecimento pela inovação tecnológica, proporcionando eficiente produção. E o fornecimento aos funcionários de um ambiente de trabalho seguro e respeitoso.

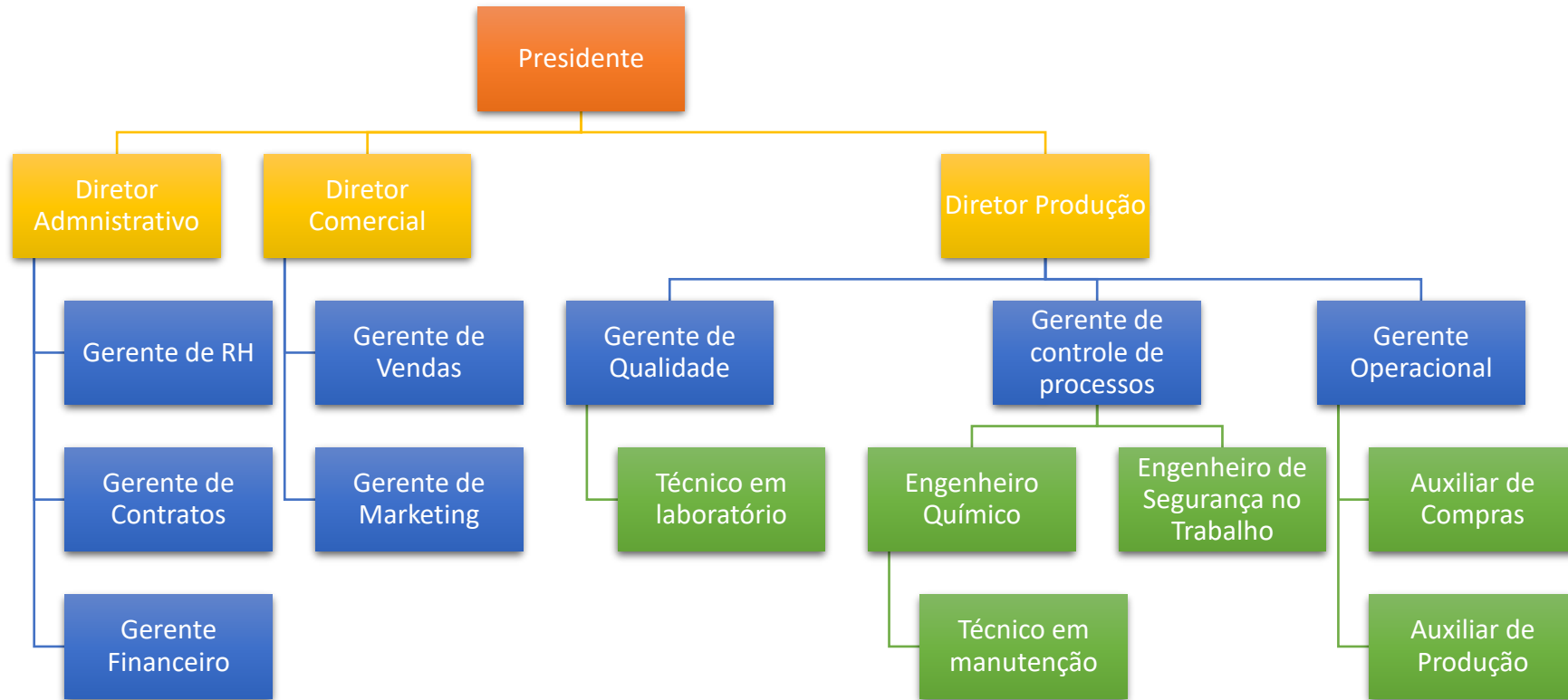
Valores:

- Atuar de forma justa, visando a integridade da empresa, ética e honesta e garantir que acordos com clientes e parceiros sejam cumpridos;
- Cumprir com eficiência o processo, fornecendo produto de alta qualidade;
- Obedecer às normas legislativas de segurança, protegendo colaboradores e clientes;
- Respeitar o meio ambiente, colocando a responsabilidade socioambiental sempre a frente;
- Transmitir confiança e transparência aos clientes e colaboradores;
- Prezar pela inovação.

3.3 Organograma

A BioG, como empresa de médio porte, classificada por meio da avaliação de produção em relação às outras empresas de mesmo seguimento, possui sua organização hierárquica dos cargos apresentada na Figura 2. Essa se configura em um organograma encabeçado por um presidente, abaixo ficam os diretores de áreas específicas, seguidos pelos gerentes.

Figura 2 - Organograma da indústria de biogás BioG



Fonte: Autoria Própria (2022)

4 HISTÓRIA DO BIOGÁS

4.1 História no mundo

Desde os tempos antigos, havia nas profundezas marítimas a decomposição da matéria orgânica em eventos anóxicos. No entanto, com o passar dos anos foram surgindo técnicas para a produção de biogás, iniciadas entre os séculos XIX e XX (KARLSSON *et al.*, 2014).

Por volta do ano de 1857, o biogás começou a ser utilizado como combustível e no sistema de iluminação ou de aquecimento urbano, em que foi sugerida por Louis Pasteur junto com Ulysse Gayon, uma vez que eles obtiveram 100 litros de gás por metro cúbico, através da fermentação anaeróbica do esterco com água. Vale ressaltar que na Índia iniciava-se o uso do biogás para aquecimento e iluminação (CIBIOGÁS: ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2012).

Como citado anteriormente, nos dias atuais, o continente europeu apresenta um certo destaque quanto a produção de biogás, no qual grande parte de sua produção é voltada para produção de energia, após a conversão do biometano e apresentar a qualidade de gás natural. Contudo, essa matriz energética vem sendo cada vez mais incorporada nos países europeus (GUERREIRO, 2020).

4.2 História no Brasil

O biogás no Brasil se iniciou com a crise do petróleo em 1979, porém por volta de 1984 teve a criação Projeto de Difusão do Biogás (CIBIOGÁS: ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2012). Entretanto, por causa da falta de conhecimento e mão de obra especializada fez com que a tecnologia fosse negligenciada, gerando dificuldades para o programa em atingir as suas metas (KARLSSON *et al.*, 2014).

A partir dos anos de 1990 a 2000, o biogás se tornou, novamente, uma alternativa a fim de reduzir as emissões dos gases que agredem no efeito estufa através dos Créditos de Carbono e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MARIANE, 2018).

Com o intuito de reduzir as emissões de gases do efeito estufa, o tema voltou a ser discutido no século 21, fazendo com que o Governo Federal fizesse incentivos para a aplicação dessa tecnologia em propriedades rurais. A partir de todo esse

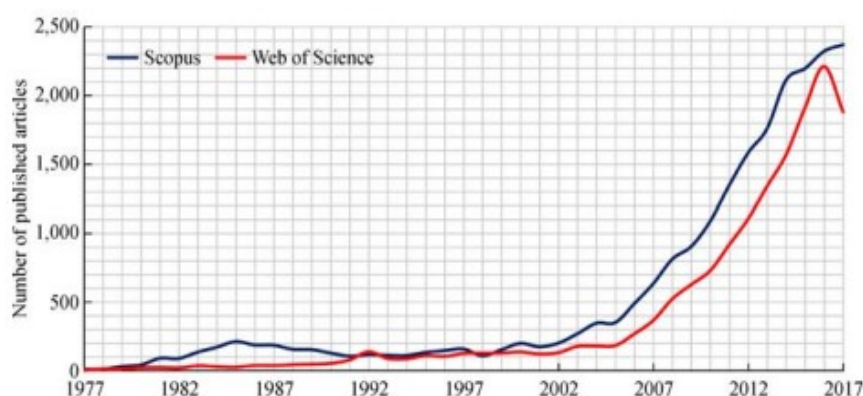
contexto, surge a oportunidade de explorar mais afundo esta fonte de energia, com o intuito de acompanhar o desenvolvimento tecnológico do país e, contribuir com o meio ambiente (CIBIOGÁS: ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2012).

5 ANÁLISE DE MERCADO

5.1 Cenário mundial e nacional

A fim de buscar fontes de energias renováveis para suprir a necessidade humana, o mundo tem se voltado para soluções inovadoras e que estejam em harmonia com o meio ambiente. A partir do ano de 1970, com o aumento do preço do petróleo, a busca por tais energias, sendo a principal o biogás, teve um aumento significativo. Resultado de tal crise energética e mais a frente as mudanças climáticas, houve crescimento das pesquisas publicadas em jornais científicos relacionadas com o tema, como pode ser notado a partir da Figura 3 (KOUGIAS; ANGELIDAKI, 2018).

Figura 3 - Número anual de artigos publicados no “Scopus” e “Web of Science”, baseado na palavra-chave “biogás”



Fonte: KOUGIAS; ANGELIDAKI (2018)

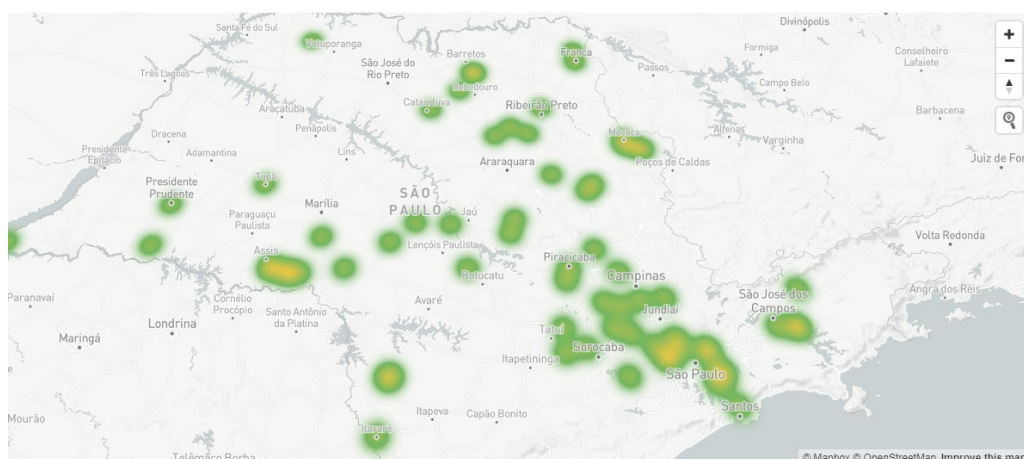
No continente europeu, o cenário do biogás apresenta um alto crescimento em relação a esta fonte, no qual em alguns países já vem incorporando essa matriz energética, através da implementação de usinas. A *European Biogas Association* aponta o biometano, durante os próximos 30 anos, como um dos principais protagonistas em relação as energias renováveis, no qual estima-se que essa matriz energética corresponda por volta de 30% a 40% do consumo local em 2050, sendo essa produção cinco vezes superior à atual (BIOENERGY INSIGHT, 2021).

Dentre os países que se destacam na produção de biogás e biometano, os principais produtores são: Dinamarca, Alemanha e Itália, liderando o desenvolvimento deste mercado (BOESGAARD *et al.*, 2019).

Atualmente, o número de plantas de processamento de biogás no Brasil é por volta de 811 unidades, nas quais a sua produção é de aproximadamente 2,81 Nm³/ano. Com esse crescimento, o país é o que se destaca na América do Sul. Entretanto, a maior parte de sua produção é utilizada como fonte de energia ou calor ao invés de combustível para veículos e demais recursos. O estado de São Paulo possui a maior produção de biogás no país, em que apresenta cerca de 69 plantas na região e produz por volta de 1,05 bilhões de biogás por ano (1,05 Bi Nm³/ano) (CIBIOGÁS, 2021).

Grande parte de sua produção concentra-se no leste do estado, como pode ser visto por meio da Figura 4, em que a maior parte das plantas estão próximas a região de Campinas.

Figura 4 - Localização das Plantas de Biogás

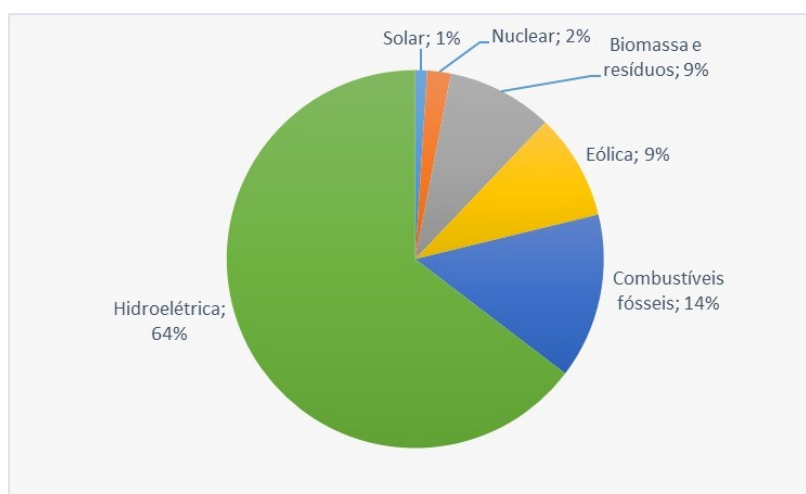


Fonte: BiogásMap (2021)

5.1.1 Demanda de mercado

Em 2019, o Brasil foi o oitavo país que mais consumiu de energia elétrica no mundo, sendo a maior parte dessa energia produzida por hidrelétricas. O país é o segundo maior produtor de energia elétrica advinda dessa fonte, sendo que, do total de energia produzida, 64% são provenientes desta matriz energética, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Total de energia produzida pelo Brasil por tipo de combustível no ano de 2019



Fonte: Adaptado de *Chart by U.S. Energy Information Administration, based on data from BP Statistical Review of Energy (2020)*

A geração de energia elétrica foi de 615 bilhões de quilowatts-hora (kWh) em 2019, podendo-se notar que 9% dessa produção foi com o uso de biomassa e reaproveitamento de matéria orgânica, explicitando que ainda há grande espaço para ser explorado dentro dessa fonte energética (*INTERNATIONAL ENERGY STATISTICS*, 2019).

Vale ainda ressaltar que dentre esses 9%, existe uma quantidade ainda pequena que é destinada para a produção de biometano o qual é potencial substituto do diesel, gás natural e gasolina. Recentemente, o governo brasileiro atribuiu incentivos ao setor, com o objetivo de aumentar a produção de biometano para 2,3 milhões de metros cúbicos por dia em 2027, atualmente esse número é de 400 mil metros cúbicos por dia (Governo do Brasil, 2022).

Além disso, nos últimos anos foi notada uma grande dificuldade com relação ao nível dos reservatórios de água do país, os quais permaneceram por um período abaixo dos níveis médios, deixando evidente que com o passar dos anos isso pode ser um problema para a produção de energia a partir de hidrelétricas (MOURA, 2022).

A produção de energia advinda de biogás ainda é incipiente no país, apesar de as primeiras produções por meio desta fonte terem se iniciado no ano de 1970, não lhes foram dadas a devida importância e incentivos para que ela perdurasse. A partir de 2010, o biogás voltou a atuar no mercado, principalmente em razão de suas vantagens ambientais. Resíduos sólidos urbanos (RSU) são os que predominam como fonte da produção de biogás, contendo porções de substâncias com alto

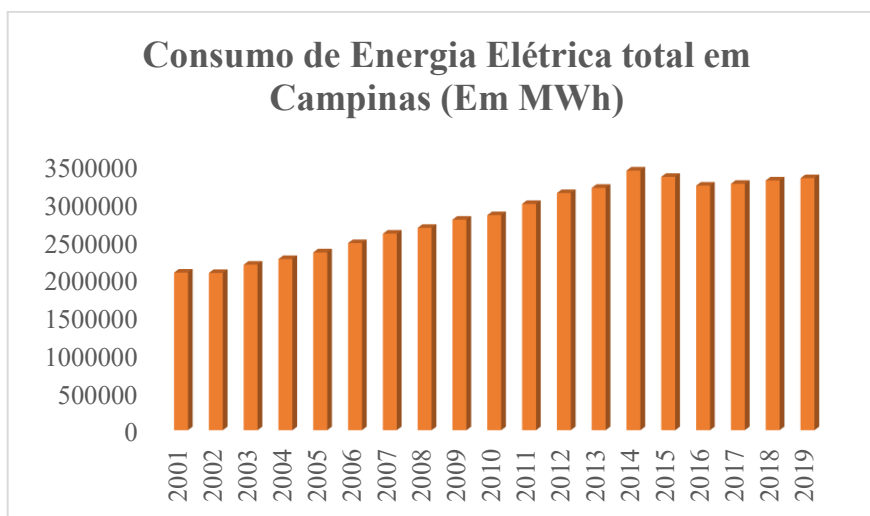
potencial de produção de gás, nomeadas de materiais orgânicos (FREITAS *et al.*, 2019).

No ano de 2014, o Brasil gerou cerca de 219 mil toneladas diárias de RSU, totalizando em média 114 mil toneladas/dia de resíduos orgânicos com a maior parte destinada a aterros sanitários (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

5.1.2 Demanda em Campinas

A cidade de Campinas é um polo industrial e comercial do estado mais populoso do Brasil. Além de indústrias e corporações, Campinas conta com grande número de habitantes, universidades, hospitais, *shoppings centers*, entre outros. A demanda por energia elétrica em Campinas tende a aumentar ano a ano acompanhando o avanço tecnológico e o crescimento populacional, como apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Consumo de Energia Elétrica total em Campinas (MWh)



Fonte: Adaptado de Região Campinas (2019)

Por meio da Figura 6, percebe-se a grande demanda e a tendência de aumento por energia na cidade, mostrando-se amplo mercado a ser explorado. Esse mercado se expande quando se cita o consumo de energia elétrica proveniente de fontes renováveis que não prejudicam o meio ambiente.

5.2 Público-alvo

A BioG tem como objetivo ser uma empresa lucrativa, que conseguirá capital para pagar seus funcionários, capital de giro e receber o retorno de todo investimento feito. Assim, devido ao aumento da demanda por energia elétrica no país, por conta do crescimento populacional e desenvolvimento de novas tecnologias, a empresa tem como objetivo vender energia elétrica, a partir do biogás como combustível, para companhias de energia elétrica de Campinas. Após a produção, a energia elétrica segue para linhas de transmissão passando por transformadores que aumentam sua voltagem e vai para subestações de distribuição (CPFL, 2022).

A comercialização da energia elétrica no Brasil pode ser realizada de dois modos: mercado de curto prazo e o Ambiente de Contratação Regulada (ACR). No mercado de curto prazo, há contratação multilateral em que são feitos registros na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) que regulamenta e fiscaliza esse setor. Pelo ACR, a venda é através de leilões que são feitos pela ANEEL com contratos registrados com as regulamentações da ANEEL e CCEE (CPFL, 2022). A partir disso, a BioG optará em realizar a venda de energia elétrica pelos dois métodos, visto que o porte da empresa consegue atender ambos os mercados.

5.3 Local de implantação

A Usina de biogás BioG estará localizada na cidade de Campinas, no interior do estado de São Paulo, sendo essa uma localização estratégica pois apresenta incentivos fiscais, alta demanda de mercado e abundância de matéria prima. A Figura 7 ilustra a Região Metropolitana de Campinas, que é composta por 20 cidades, totalizando 3,1 milhões de habitantes e contém um grande parque industrial composto por diversos setores industriais (EMPLASA, 2018).

Figura 7 - Mapa da Região Metropolitana de Campinas

Fonte: Emplasa, GIP/CDI (2018)

A BioG será implantada ao lado do aterro sanitário delta A de Campinas, localizada na Rodovia dos Bandeirantes, com área total de 97.450,40 m², com perímetro de 1,36 km, como ilustrado na Figura 8. Sua localização é estratégica, pois ficará próximo ao local em que há a separação do material orgânico que será fonte de matéria prima para a empresa, com isso, há economia no custo de transporte da matéria.

Figura 8 - Localização da BioG



Fonte: Google Maps (2022)

5.3.1 Economia de Campinas

Campinas possui uma população estimada de 1.223.237 pessoas, apresentando um PIB per capita de R\$54.710,07 (IBGE, 2021). É a décima cidade mais rica do Brasil, pois recebe investimentos em diversas áreas, abrangendo tanto empresas nacionais como internacionais. Assim, possui 2,5% do PIB brasileiro contendo o terceiro maior núcleo industrial (SILVERIO, 2021).

5.3.2 Incentivos fiscais

De acordo com a Prefeitura Municipal de Campinas (2021), há um programa de ativação econômica e social que visa crescer a economia da cidade com a geração de empregos, através de diminuição de impostos. Dessa forma, em 2021 foi aprovado uma nova lei que visa oferecer R\$ 4 bilhões de investimentos para o local, proporcionando mais de 20 mil empregos. Com isso, as indústrias passam a ter

benefícios com a redução do ISSQN de 5% de alíquota para 2%, isenção de IPTU e ITBI.

5.3.3 Centros de pesquisa

A cidade tem o reconhecimento na área de pesquisas e desenvolvimento, sendo a capital da inovação e ciência no Brasil, com universidades como a UNICAMP que geram patentes no país. Ademais, há 18 faculdades de ensino superior formando profissionais de todas as áreas (Guia do Investimento, 2019).

5.3.4 Abundância de matéria-prima

De acordo com a Prefeitura Municipal de Campinas (2018), a cidade possuiu o recolhimento de 1350 ton.d⁻¹ de RSU no ano de 2018, sendo a composição destes resíduos: 39,3% de matéria orgânica, 15,6% de madeira, 11,9% de papel e papelão, 9,6% de tecido, dentre outras quantidades menos expressivas de plástico, borracha e metais. Estes resíduos estão dispostos em aterros sanitários, podendo ser aplicados à finalidade discutida neste trabalho após uma sequência de processos de triagem adequados. Para o processo em questão, serão utilizados 1000 ton.mês⁻¹ de RSU.

6 JUSTIFICATIVA

Pode-se notar a demanda crescente por energia elétrica não só na cidade de Campinas, mas em todo o país. Além disso, a energia proveniente de fontes renováveis que possam contribuir para a diminuição de rejeitos em aterros sanitários e sejam favoráveis ao meio ambiente possui vasto mercado para ser explorado dentre as fontes de energias atuais.

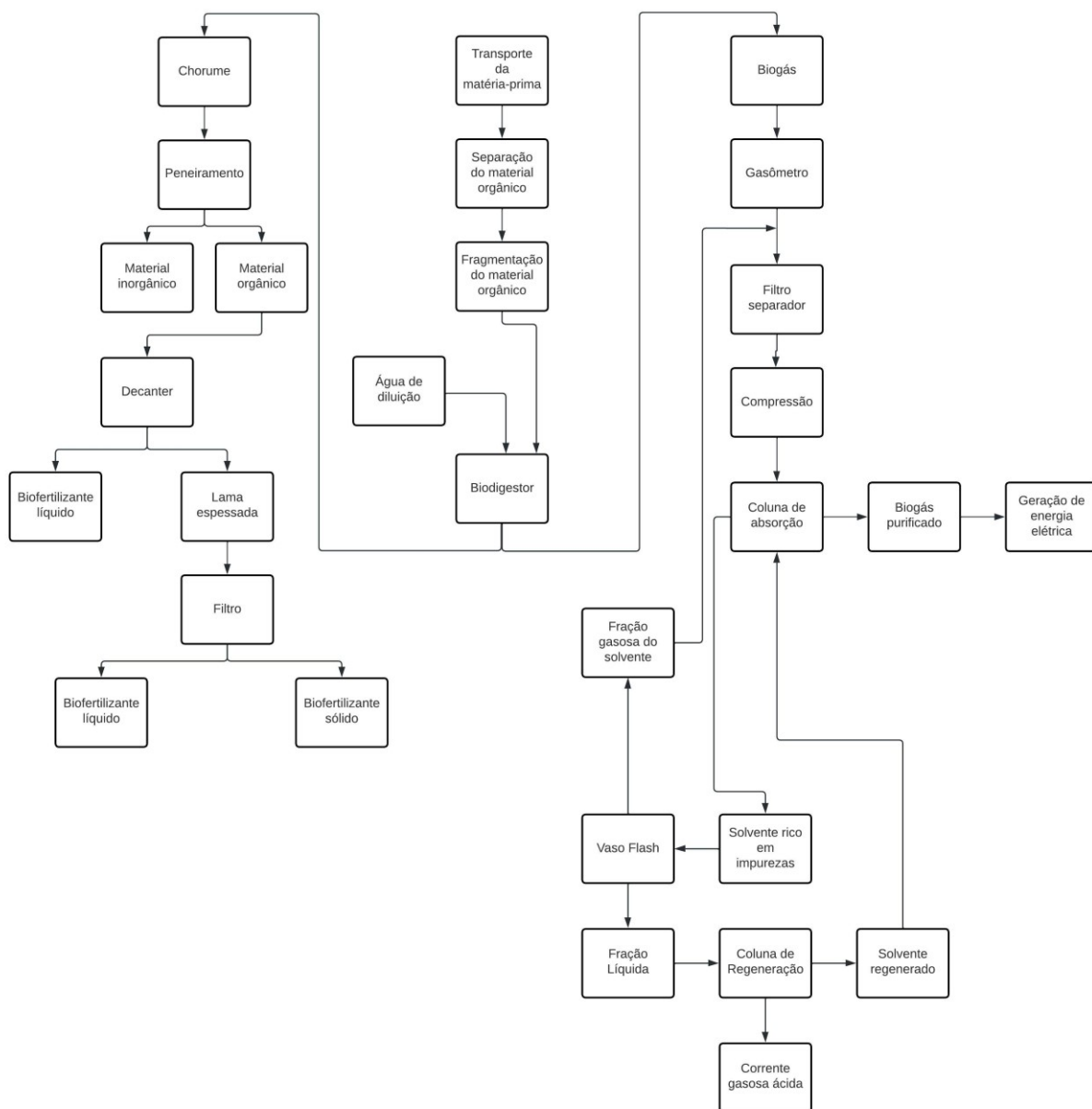
A BioG também compactua com as boas práticas industriais perante o consumidor e ao ambiente. Por isso é uma empresa que adotará práticas ESG (*Environmental, Social and Governance*), as quais surgiram em 2005 em uma conferência da ONU com o intuito de direcionar as empresas do mundo todo para boas práticas ambientais, sociais e de governança, confirmando mais uma vez o compromisso com os mesmos, assim como a ODS (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável) da UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*), de número 7, que visa atingir os objetivos de energia limpa e acessível para todos.

A BioG será uma empresa que irá produzir energia elétrica limpa para companhia transmissora de energia ou empresas privadas, essa produção será proveniente da digestão anaeróbia para a produção de biogás, tal digestão terá como matérias-primas os resíduos sólidos urbanos e o lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto da cidade de Campinas.

7 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo para a obtenção do biogás e geração de energia elétrica está representado, na forma de fluxograma de blocos, na Figura 9. Em seguida, tem-se a descrição de cada parte do processo.

Figura 9 - Fluxograma do processo para a obtenção do biogás e energia elétrica



Fonte: Autoria Própria (2022)

7.1 Transporte de matéria-prima

Para o presente trabalho escolheu-se como matéria orgânica para obtenção do biogás os resíduos sólidos urbanos (RSU) bruto, os quais são definidos de acordo com a NBR 10004 (2004) como “Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p.1). O termo bruto se refere ao fato de que estes resíduos serão recolhidos sem tratamento prévio, em locais licenciados por órgãos ambientais para o recebimento dos mesmos.

Assim, a matéria-prima, com composição de 39,3% de matéria orgânica, 15,6% de madeira, 11,9% de papel e papelão, 9,6% de tecido, dentre outras quantidades menos expressivas, com já citado anteriormente, será recolhida do aterro sanitário através de transporte terrestre rodoviário, de forma que sejam seguidas as medidas sanitárias recomendadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021), discurridas na NBR 13221. Tal norma enfatiza a necessidade de que este transporte seja com equipamentos adequados, em bom estado de conservação, com tolerância nula para vazamentos ou derramamentos de resíduos.

Desta forma, será realizado o recolhimento do RSU bruto, este será transportado para a usina de produção de biometano, BioG, onde será realizado o descarregamento em câmaras de controle de odor. Este galpão terá sua abertura realizada apenas nas circunstâncias de descarregamento dos resíduos, de forma que a atmosfera formada pela presença da biomassa será filtrada através de biofiltros (VANEK *et. al*, 2011). Estes filtros atuarão através de um material com enchimento biológico ativo que degradam poluentes orgânicos ou inorgânicos em produtos como água, sais minerais e biomassa (CONVERTI; ZILLI, 1999).

A fim de que haja a decomposição anaeróbica citada acima, além da matéria orgânica se faz necessário a utilização de uma suspensão microbiológica, a qual recebe o nome de inóculo. Especificamente para a produção de biogás, o inóculo é caracterizado por bactérias fermentativas anaeróbicas, as quais por meio das etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese, efetivam a transformação do RSU em um combustível economicamente viável. Para isso, há a necessidade do controle das condições de operação, como temperatura – condições

mesofílicas com temperaturas medianas de 35°C, pH e presença de sólidos (ALVAREZ *et al*, 2000).

O presente trabalho aborda a utilização dos lodos primário e secundário presentes nas estações de tratamento de esgoto (ETE) como inóculo para a degradação dos resíduos sólidos urbanos. Os lodos adquiridos nos decantadores primários recebem a nomenclatura de lodo 1º, sendo de forma análoga para o lodo 2º. Esta medida é de grande vantagem para os órgãos responsáveis pelo tratamento sanitário, dado que o tratamento exigido para estes lodos representa um terço do custo de operação de uma ETE (CASSINI, 2003).

O transporte deste inóculo é regularizado pela Resolução CONAMA nº 375 de 2006, a qual determina que esta movimentação deve ocorrer em caminhões com carroceria vedada – como caminhões basculantes. Estes devem contar com sistema de trava da tampa traseira, lona plástica para cobertura, garantindo que o transporte deste material seja de forma segura para o motorista, bem como para o meio ambiente. Além de estabelecer as diretrizes de transporte, esta resolução incorpora também as concentrações máximas de substâncias inorgânicas, dispostas na Seção III. Assim, o lodo será transportado da ETE para a usina, onde será despejado em um tanque de armazenamento prévio à utilização no biodigestor.

7.2 Separação do material orgânico

Como matéria-prima para biomassa serão utilizados os RSU brutos, faz-se necessária a separação do material orgânico de forma adequada. De acordo com a Prefeitura Municipal de Campinas (2018), a coleta seletiva alcançou 75% da área urbana, mas para que seja garantido que o material que será destinado ao biodigestor seja apenas orgânico, é de extrema importância a separação deste.

Para isso é realizada a triagem, que promove a separação do material orgânico e recuperação dos materiais recicláveis, sendo realizada de forma manual e por meio de equipamentos. Segundo Gomes *et al.* (2016), indústrias de biogás são consideradas plantas de Tratamento Mecânico Biológico (TMB), pois o sistema de triagem é de suma importância.

Existem diversos equipamentos que podem ser utilizados com a finalidade de realizar a separação. Desta forma, para uma triagem eficiente, pode-se aplicar primeiramente uma peneira rotativa elétrica (*trommels*), peneirando grande

quantidade de material orgânico e o material mais grosseiro, separando em uma fração de granulometria menor, predominantemente orgânico, fração média que possui recicláveis e resíduos e a granulometria maior é constituída majoritariamente de recicláveis (TAVARES *et al.*, 2019). Posteriormente, realiza-se uma triagem manual, garantindo que materiais inorgânicos com granulometria menor, sejam retirados, evitando que prejudiquem a digestão. O material reciclável recolhido pode ser enfardado e comercializado. Em seguida, para garantir que no material tenha apenas matéria orgânica, pode-se instalar um separador magnético, garantindo que resíduos metálicos sejam retirados (COLTURATO *et al.*, 2016).

No final da separação, pesa-se o material orgânico obtido, a fim de se monitorar a quantidade de matéria orgânica para que se possa ter um controle da produção.

7.3 Fragmentação do material orgânico

O material orgânico proveniente da separação já estará em uma fração granulométrica de menor tamanho. A fragmentação do material é de extrema importância, pois quanto menor for o tamanho das partículas, maior será a taxa de biodegradação, que posteriormente resultará na produção do metano. Além disso, a trituração facilita a homogeneização da matéria e pode aumentar a produção de biogás por metro cúbico de resíduo (HARTMANN *et al.*, 2000).

Tem-se variados equipamentos que podem ser utilizados para reduzir a dimensão do material orgânico, sendo um deles o moinho de rolos mecânico (POSTEL *et al.*, 2010).

7.4 Biodigestor

Como o resíduo é proveniente de RSU, por mais que a triagem tenha sido realizada de forma adequada, ainda é possível que contenha impurezas, como vidros ou plásticos, desta forma, o processo pode ser realizado de forma descontínua. Além disso, a biomassa, RSU, terá disponibilidade em períodos mais longos, quando essa é transportada do aterro sanitário para a indústria, sendo seu tempo de residência de trinta dias. Além das reações biológicas e cinética do consumo de substrato e formação do produto serem mais simples para um processo descontínuo. Portanto, o

biodigestor será um reator batelada, que realizará o processo de digestão anaeróbia dos resíduos, ou seja, na ausência de oxigênio (GOMES *et al.*, 2016).

Então o material orgânico é transferido diretamente para o biodigestor, onde será diluído e homogeneizado. A homogeneização é importante pois auxilia na estabilidade do processo fermentativo, podendo ser realizado o processo por meio de agitadores (POSTEL *et al.*, 2010).

Outro fator que deve ser levado em consideração é a diluição da matéria-prima, essa deve ser adequada para que a digestão ocorra de forma eficiente, sendo necessária uma relação sólido/líquido ideal. O processo de digestão pode conter mais de 20% de sólidos totais, sendo esse processo considerado digestão anaeróbica seca, quando se tem até 20% de sólidos totais é classificado como processo úmido (NAZARO, 2016).

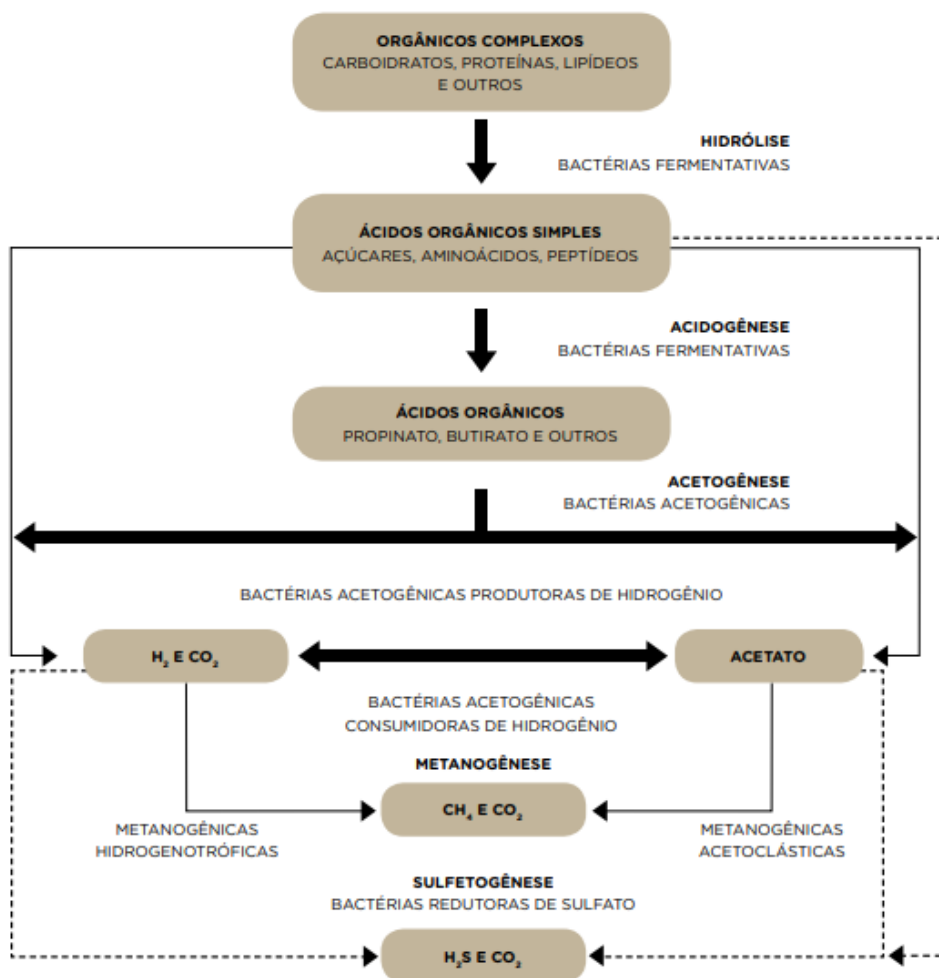
O inóculo, lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto, possui um grupo microbiota diversificado, pelo contato com variadas substâncias, desta forma, maior essa diversidade, melhor a digestão do substrato (ANGELIDAKI *et al.*, 2009).

O lodo, previamente tratado na ETE, segundo o Ministério da Saúde (2014), é também diretamente levado ao biodigestor, ou seja, este será transportado e utilizado apenas a cada 30 dias, que será o tempo de batelada.

O funcionamento, de forma geral, consiste em completar o biodigestor com a biomassa e o inóculo, sendo esse um tanque completamente fechado. Desta forma, quando os microrganismos presentes no inóculo estão em contato com a biomassa, ocorre a reação bioquímica, sendo essa exotérmica, liberando calor. Para que se atinja a temperatura ideal, entre 20 e 40°C, pode-se utilizar um reator encamisado ou um trocador de calor. Em seguida, os microrganismos transformam a biomassa em biogás, sendo utilizado um tempo de reação de trinta dias. O biogás formado é captado pela tubulação coletora de gás (POSTEL *et al.*, 2010).

No biodigestor ocorre um processo biológico, constituído de cinco fases metabólicas, sendo, em sequência, a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese, a metanogênese e a sulfetogênese, como representa a Figura 10, na qual é descrito o processo de conversão do material orgânico complexo em biogás (TAVARES *et al.*, 2019).

Figura 10 - Sequência metabólica do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Gomes (2010)

Primeiramente há a hidrólise, sendo a sua finalidade converter materiais orgânicos complexos (polímeros) em particulados de menor peso molecular e mais simples (monômeros). Desta forma, essa etapa é de extrema importância, pois a partir desta quebra é possível que os microrganismos consumam as moléculas menores, iniciando a biodigestão, aproveitando a energia contida nas mesmas. Então proteínas, lipídios e carboidratos são convertidos em aminoácidos, ácidos graxos e açúcares, respectivamente (KARLSSON et al., 2014).

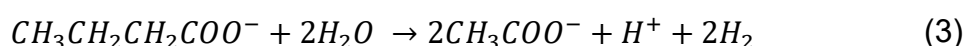
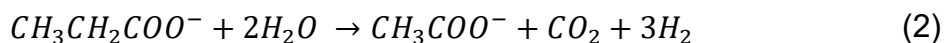
Segundo Araújo (2017) a quebra de polímeros em monômeros é representada pela Equação 1.



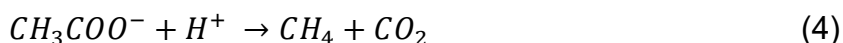
Onde $RCOOR$ são ésteres, $RCOOH$ são ácidos carboxílicos e ROH álcoois.

A segunda fase é conhecida por acidogênese, pela formação de ácidos orgânicos. Nela os compostos gerados na hidrólise são absorvidos nas células das bactérias fermentativas, sendo um gênero muito utilizado o *Clostridium*, e metabolizados, ou seja, são convertidos em compostos mais simples, como ácidos orgânicos (ácido acético, propanóico, butanóico, láctico), álcoois, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio. A concentração de hidrogênio nessa fase é de suma importância, pois quando essa é elevada, ocorre o acúmulo de ácidos orgânicos, sendo necessária a diminuição do pH, prejudicando o processo (TAVARES *et al.*, 2019).

Posteriormente, tem-se a fase da acetogênese, essa fase desempenha um papel essencial entre a acidogênese e a metanogênese, pois bactérias acetogênicas, sendo as mais utilizadas *Syntrophobacter* e *Syntrophomonas*, convertem produtos provenientes da acidogênese, como butirato ($CH_3CH_2CH_2COO^-$) e propionato ($CH_3CH_2COO^-$), em compostos usados na produção do metano, ou seja, em acetato (CH_3COO^-), hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2). De acordo com Khanal (2008), as conversões de propionato e butirato a acetato estão representados pelas Equações 2 e 3, respectivamente.



A quarta fase metabólica é a metanogênese, na qual acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, da etapa anterior, são transformados em metano (CH_4) pelas bactérias metanogênicas, classificadas em acetotróficas ou hidrogenotróficas, exemplos de gêneros são *Methanosaeta* e *Methanobacterium*, respectivamente. A primeira produz metano (CH_4) a partir da redução de acetato (CH_3COO^-), já a segunda metaboliza o dióxido de carbono (CO_2) e o hidrogênio (H_2), sendo que 1/3 do metano é gerado a partir das bactérias hidrogenotróficas e 2/3 restante são produzidos pelas bactérias acetotróficas (MACKIE; BRYANT, 1981). As Equações 4 e 5 representam, respectivamente, a ação dos microrganismos metanogênicos supracitados (ARAÚJO, 2017).





Por fim, ocorre a sulfetogênese na qual é gerado o sulfeto de hidrogênio (H_2S), por meio de bactérias sulforredutoras, que agem sobre sulfatos e demais sulfurados. Não é de interesse que esse processo aconteça, pois os doadores de elétrons que seriam destinados para a geração do gás metano, são utilizados por essas bactérias, resultando em um composto indesejado, aumentando a produção do gás sulfídrico, gás tóxico e corrosivo, e a diminuição do metano (TAVARES *et al.*, 2019).

Demais reações presentes no processo biológico estão apresentadas na Tabela 1, juntamente com valores da variação da energia livre em condições padrão.

Tabela 1 - Reações importantes nos processos anaeróbios

Oxidações	Reações	$\Delta G_0, kJ$
Propionato → Acetato	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + H_2$	+76,1
Butirato → Acetato	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+48,1
Etanol → Acetato	$CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+9,6
Lactato → Acetato	$CH_3CHOHCOO^- \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 2H_2$	-4,2
Acetato → Metano	$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow HCO_3^- + CH_4$	-31
Reduções	Reações	
HCO_3^- → Acetato	$2HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \rightarrow CH_3COO^- + 4H_2O$	-104,6
HCO_3^- → Metano	$HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135,6
Sulfato → Sulfeto	$SO_4^{2-} + 4H_2 + H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O$	-151,9
Sulfato → Sulfeto	$SO_4^{2-} + CH_3COO^- + H^+ \rightarrow 2HCO_3^- + H_2S$	-59,9
Nitrato → Amônia	$NO_3^- + 4H_2 + 2H^+ \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$	-559,9
Nitrato → Amônia	$NO_3^- + 4H_2 + 2H^+ \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$	-511,4
Nitrato → Nitrogênio	$2NO_3^- + 5H_2 + 2H^+ \rightarrow N_2 + 6H_2O$	-1120,5

Fonte: Zenatti (2019)

Outro fator que define os biodigestores é a temperatura de operação, relacionada à temperatura de sobrevivência do microrganismo, sendo divididos em mesofílicos e termofílicos. O primeiro tipo opera entre 20 e 40°C, os resíduos possuem maior tempo de permanência dentro do biodigestor, aproximadamente de 15 a 30 dias, além de os processos biológicos serem mais simples. Já o segundo opera a temperaturas equivalentes a 50 e 60°C, possibilitando menor permanência dentro do biodigestor, em torno de 12 a 14 dias, requer mais manutenções e possui uma tecnologia mais complexa (TAVARES *et al.*, 2019).

Segundo Araújo (2017), no biodigestor batelada é utilizada a sua capacidade máxima, então há o armazenamento completo da biomassa, mantendo-a até a biodigestão completa da matéria orgânica, posteriormente, são retirados os dejetos e uma nova carga é realizada. Eles são construídos em aço ou concreto, equipados com trocadores de calor e isolantes que retém calor. O biogás é recolhido na parte superior e o dejetos é extraído por meio de bombas. Portanto, esse tipo de biodigestor é considerado de estrutura simples, pois conta apenas com a câmara de biodigestão e com um medidor de gás.

Como vantagens, na operação em batelada, pode-se destacar a simplicidade, a manutenção mínima e menor custo capital. Em contrapartida, necessita-se de maior tempo e gasta-se mais energia (MARCUCCI, 2018).

O biodigestor batelada está demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Biodigestor do tipo batelada



Fonte: Aqualimpia (2017)

Após a ocorrência das cinco etapas sequenciais do processo de digestão anaeróbica dos resíduos sólidos urbanos, o biogás é obtido. Sua composição química varia proporcionalmente de acordo com a composição química da matéria recolhida no aterro sanitário. Dessa forma, o biogás produzido possui em média de 55 a 70% por volume de gás metano, de 30 a 45% de dióxido de carbono e de 200 a 4.000 ppm por volume de sulfeto de hidrogênio (LINS *et al.*, 2015).

7.5 Gasômetro

Dado que o presente trabalho aborda um processo descontínuo, se faz necessário a utilização de um gasômetro, equipamento industrial com função de

armazenar gases e, em alguns casos, manter o controle de temperatura e pressão (MICHAELIS, 2022). Para este processo o gasômetro possui função exclusiva de armazenamento, para que o biogás advindo da biodigestão seja reservado, para posterior purificação.

Estes aparatos devem ser herméticos, estanques e resistentes às intempéries naturais como luz ultravioleta, temperatura e clima. Além disso, é necessário que apresentem dispositivos de controle em casos de baixa ou elevada pressão, como queimadores de gás. Comumente são formados de membranas plásticas, as quais necessitam possuir resistência à ruptura, baixa permeabilidade ao gás metano, estabilidade térmica, resistência à corrosão, além de haver a certificação de que não há vazamentos na estrutura (FACHVERBAND BIOGAS, 2017). A Figura 12 apresenta um gasômetro de lona flexível.

Figura 12 – Gasômetro de lona utilizado para armazenamento de biogás



Fonte: Schulte (2013)

7.6 Purificação

O biogás produzido necessita ser purificado por meio da remoção de umidade, gás carbônico e sulfeto de hidrogênio, pois a combinação destes gera o processo de corrosão em tanques de armazenamento, turbinas e motores veiculares. Além disso, o gás sulfeto de hidrogênio apresenta alta toxicidade e é considerado um gás poluente, trazendo malefícios quando é queimado para produção de energia, pois

forma o óxido de enxofre (SO_2), gás que quando combinado com a água produz a chuva ácida.

Outra impureza presente no biogás oriundo de compostos de aterros sanitário e estações de esgoto são os siloxanos, compostos químicos caracterizados pela presença de dois átomos de silício ligados por um átomo de oxigênio, cuja fórmula molecular geral é dada por $R_3Si - [O - SiR_2]_n - O - SiR_3$. Este grupo pode ter em seus radicais átomos de hidrogênio ou grupos alquila, e são presentes em produtos como agentes de limpeza em cosméticos, desodorantes, sabões, dentre outros (LÖTTERS *et al.*, 1997). Os siloxanos quando analisados como um resíduo a ser tratado, é separado em duas classificações: siloxanos com baixo ou alto peso molecular. Levando em consideração os compostos com baixo peso molecular, pode-se analisá-los como Compostos Orgânicos Voláteis (COV), sendo estes organosilicones oxidados quando presentes na atmosfera, através do grupo hidroxila (HO^-) (DEWLL *et al.*, 2006).

O grupo de organosilicones que não se comporta como COV não é degradado pelo ar atmosférico, dado que estes apresentam elevado peso molecular e não possuem característica de alta volatilidade. Sendo assim, é necessário compreender as interferências destes compostos nos compartimentos terrestres e aquáticos. Sua característica de massa específica inferior a $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ faz com que não haja a solubilização dos mesmos em água, sendo caracterizado como um material suspenso não bioacumulável. Além disso, quando presentes no solo são despolimerizados por hidrólise, sendo transformados em siloxanos voláteis suscetíveis a oxidação citada acima. Desta forma, os compostos siloxanos presentes nos resíduos da purificação do biogás não apresentam riscos à saúde humana ou ao meio ambiente, podendo ser despejados na rede de tratamento de esgoto ou na atmosfera (LENHMANN *et al.*, 1998).

A purificação do biogás pode ser realizada por diferentes metodologias, tais como por meio da utilização de membranas, por *Water Scrubbing* – absorção física tendo como solvente a água e *Pressure Swing Adsorption* – adsorção sob pressão com materiais adsorventes como sílica gel ou alumina. Além destas técnicas, destacam-se os processos biológicos, métodos que envolvem separação criogênica ou *Polyethylene Glycol Scrubbing* – absorção física tendo como solvente a solução de polietilenoglicol (FLOCK *et al.*, 2018). O presente trabalho terá como metodologia escolhida a absorção gasosa por solvente orgânico, pois se trata da única metodologia

capaz de realizar a absorção de todas as impurezas presentes no biogás (gás carbônico, gás sulfídrico e amônia).

Como adjunto preliminar às etapas de purificação do biogás, tem-se a instalação de um filtro para que o material particulado carregado junto à corrente de biogás seja retirado. Para isso, de acordo com Persson *et al.* (2007), recomenda-se o uso de filtros de 2 a 5 microns de espessura.

7.6.1 Remoção de umidade, gás carbônico, sulfeto de hidrogênio e siloxanos

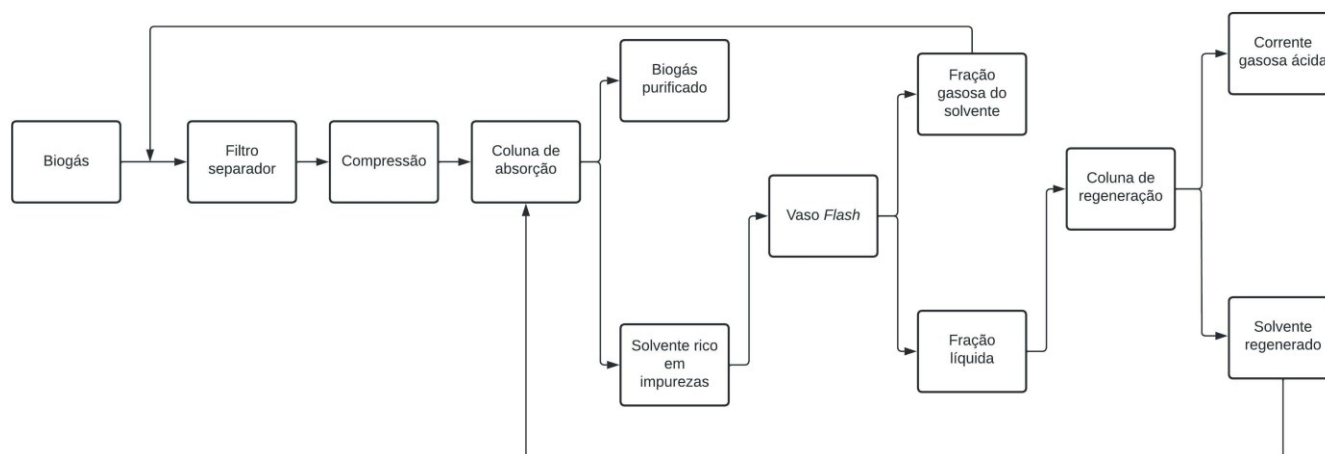
A remoção destas substâncias do biogás é de suma importância para que sejam evitados processos oxidativos quando estes entram em contato com compressores, tubulações, válvulas, dentre outros instrumentos envolvidos nos demais processos. Assim, neste trabalho será abordado esta remoção das impurezas do biogás por meio de um sistema de torres de absorção que, por meio da propriedade de solubilidade em solventes, serão retiradas da corrente de biogás (PROBIOGÁS, 2016).

Esta purificação é realizada por meio do processo de absorção física, tendo como corrente absorvente a solução de polietilenoglicol, encontrado comercialmente como Selexol® – mistura de éteres dimetílicos de polietilenoglicol. Este processo usualmente ocorre sob elevadas pressões e baixas temperaturas, sendo necessário então a compressão do gás advindo da biodigestão e o resfriamento do mesmo após a compressão. Utiliza-se este solvente pois o gás carbônico e o gás sulfídrico apresentam grande solubilidade no mesmo, diferentemente do metano, fazendo com que seja menor a quantidade necessária de solvente quando comparada a uma absorção com água, apenas (ZHAO *et al.*, 2010).

Após a pressurização, o biogás é conduzido por um sistema de duas colunas, tendo a solução citada escoando em contracorrente com o gás. A primeira coluna é utilizada com o objetivo de absorver a água, o sulfeto de hidrogênio e o gás carbônico, enquanto a segunda é utilizada para regeneração da solução solvente. Esta regeneração ocorre através do escoamento em contracorrente com a injeção de vapor de água. Entre as duas colunas há um tanque *flash*, o qual realizará a separação do solvente esgotado na primeira coluna de absorção entre uma fase líquida e uma vapor. A fase vapor é realimentada junto à corrente de biogás enquanto a fase líquida segue para ter o solvente regenerado na coluna de regeneração (ZHAO *et al.*, 2010).

Este processo de purificação possui extrema eficiência pois remove simultaneamente as impurezas citadas acima, além de remover os compostos siloxanos, amônia, cianeto de hidrogênio, água e compostos orgânicos halogenados (RYCKEBOSCH *et al.*, 2011). Este esquema de processo está representado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do processo de purificação do biogás



Fonte: Autoria própria (2022)

7.7 Geração de energia elétrica

De acordo com Lobato (2011), o biogás possui diversas utilidades, como na geração de eletricidade, combustível para caldeiras, fornos ou estufas, gás injetado na linha de gás natural ou até mesmo como combustível para veículos.

A geração de energia elétrica a biogás, atualmente, é de crescente destaque, por ser uma alternativa sustentável. Desta forma, geradores de energia ganham espaço na transformação de resíduos orgânicos em um ativo energético.

Segundo Salomon e Lora (2009), uma das vantagens da utilização do biogás para a produção de energia elétrica é a redução da emissão de metano, gerando créditos de carbono. O Brasil é país com grande potencial para essa geração, suprimindo a demanda de energia em diversos locais com altas taxas de produção.

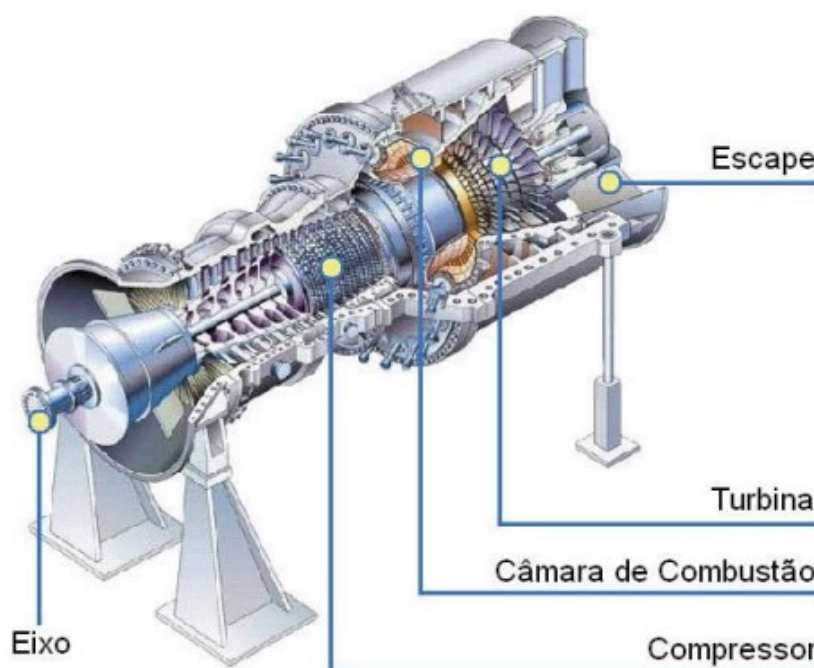
Para a geração de eletricidade, a BioG escolheu como equipamento térmico, a turbina a gás, pois esse tipo de equipamento pode ser encontrado no mercado com variadas potências, entre 500 kW e 250 MW. Seu tamanho é compacto e possui alta flexibilidade, fácil manutenção e controle automático, além de melhor conduta

ambiental quando comparado com outros equipamentos como, motores de combustão interna e turbina a vapor (GUPTA *et al.*, 2010). Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (1998), as turbinas a gás também são equipamentos que necessitam de pouco tempo de parada, ou seja, possui alta disponibilidade, são de rápida partida, sendo que o tempo para atingir seu regime permanente é de 15 minutos em condições de operação normais.

O gás que opera nesse tipo de turbina precisa ser de qualidade consistente, ou seja, já purificado, para que não tenha compostos que causem corrosão das palhetas das turbinas. Outro fator importante é que esse gás não forme cinzas durante a combustão, pois essas interferem diretamente na operação quando se depositam nas palhetas das turbinas (LOBATO, 2011).

A turbina a gás é constituída principalmente por três fundamentais componentes: compressor de ar, câmara de combustão e a turbina, como apresentado na Figura 14 (FRANÇA JUNIOR, 2008).

Figura 14 - Detalhes de uma turbina a gás



Fonte: França Junior (2008)

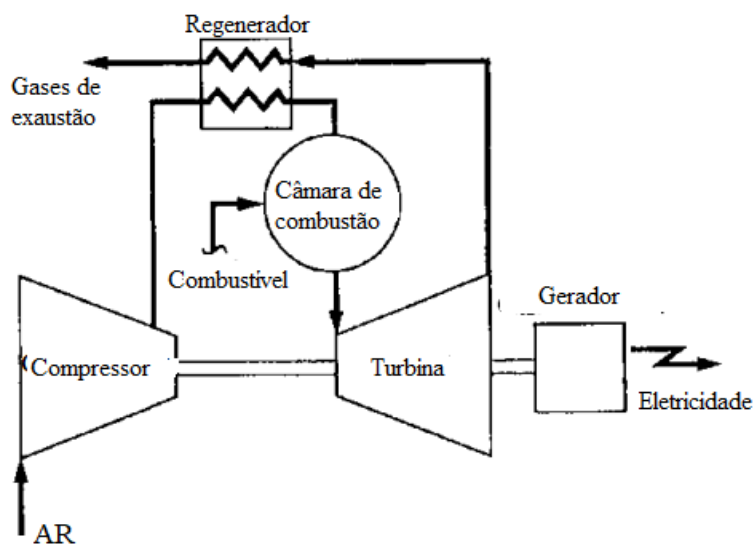
Seu funcionamento, consiste na compressão do ar, elevando a pressão. Não é necessário a adição de calor, pois o próprio trabalho de compressão aumenta a temperatura do ar, sendo que esse entra no compressor seguindo a condição padrão de 101,3 MPa, 288 K e com 60% de umidade máxima relativa. Posteriormente, o ar

comprimido, com temperatura de aproximadamente 673 a 738K, entra em contato com o combustível, biogás, na câmara de combustão, reagindo e, desta forma, inicia-se o processo de queima, sendo a pressão constante e elevada, aproximadamente de 0,61 a 1,11 MPa, e em regime contínuo (OKOROIGWE; MADHLOPA, 2015).

Os gases da combustão liberam calor, acarretando a expansão desses na turbina, movimentando suas pás e transformando a energia térmica em energia mecânica, sendo parte dessa utilizada acionando o compressor e o restante é transferida para gerador elétrico. Sendo assim, não é necessário um fluido de trabalho intermediário. Desse modo, o ciclo de uma turbina a gás segue o ciclo termodinâmico de Brayton (FRANÇA JUNIOR, 2008).

Os gases de escape, que saem com temperaturas elevadas, podem ser reutilizados por um regenerador, sendo o ideal um trocador de calor contracorrente, que recupera calor que seria perdido com a finalidade de aquecer o ar comprimido que entra na câmara de combustão. Desta forma, esse recuperador de calor, aumenta de forma significativa a eficiência da turbina. A Figura 15 apresenta o funcionamento de uma turbina a gás com regenerador (MOREIRA, 2002).

Figura 15 - Funcionamento de uma turbina a gás com regenerador



Fonte: Moreira (2002)

A energia gerada será injetada de forma direta na rede da distribuidora de energia responsável pela cidade de Campinas, seguindo a Lei nº 10.848, de 2004, que dispõe sobre a comercialização de energia elétrica. Tal legislação aborda as temáticas das obrigações e direitos dos agentes vendedores e do setor elétrico, as

garantias financeiras, penalidades, bem como as regras e procedimentos de comercialização.

7.8 Tratamento de resíduo

Os efluentes oriundos do processo descrito no presente trabalho, bem como seus respectivos tratamentos estão dispostos na Tabela 2. A seguir, tem-se a descrição de cada metodologia escolhida para estes tratamentos, bem como a preparação do resíduo aproveitável da biodigestão como biofertilizante.

Tabela 2 – Efluentes e seus respectivos tratamentos

Efluente	Tratamento	Destinação
Biomassa sólida após a biodigestão	Filtração e Decantação	Biofertilizante
Gases de exaustão da purificação do biogás	Lavador de gases	Solução aquosa de sais para ETE
Gases de exaustão da geração de energia elétrica	Redução catalítica seletiva	Atmosfera

Fonte: Autoria própria (2022)

7.8.1 Biofertilizante

Segundo informações de uma empresa do ramo de Biogás, foi possível realizar algumas constatações importantes para essa etapa do processo.

Apesar da empresa utilizar outras fontes de matéria-prima, sendo ela a vinhaça, para a produção de biogás e energia elétrica, a parte residual possui semelhanças.

Pode-se assumir que todo o resíduo que sai do processo está estabilizado e pronto para comercialização como biofertilizantes, após passar por etapas de separação de impurezas, e separação da parte sólida e parte líquida, as quais ambas serão biofertilizantes.

Portanto, nessa etapa é necessário o uso de uma peneira, decantador e um filtro. A peneira para reter toda a matéria inorgânica, deixando no sistema apenas a parte “limpa” do digestato. O decantador separará a parte líquida da parte sólida, porém, haverá ainda uma lama espessa contendo parte do digestado em fase sólida

e em fase líquida, necessitando assim de um terceiro equipamento para uma nova separação, o qual será utilizado um filtro, retirando então a parte sólida restante.

7.8.2 Correntes gasosas de exaustão

A necessidade de purificação do biogás para que este possa ser utilizado na geração de energia elétrica, a fim que não haja corrosão dos equipamentos envolvidos e de que este possua alto poder calorífico, gera uma corrente de efluente gasosa. Este efluente é resultado da regeneração do solvente Selexol®, sendo composto por gás carbônico (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e compostos siloxanos – grupo organossilício.

O gás carbônico é um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa, sendo este um gás incolor, inodoro e com maior densidade quando comparado com o ar. Dentre as consequências de sua presença na atmosfera pode-se citar a acidificação de rios e florestas bem como mudanças climáticas relacionadas ao efeito estufa (ANDERSON *et al.*, 2016). O gás sulfídrico, em relação à saúde humana, pode provocar irritação nos olhos e/ou interferir no sistema nervoso e respiratório. Este gás no âmbito ambiental quando combinado com o ozônio presente na atmosfera, pode ser oxidado a dióxido de enxofre (SO_2), o qual quando em reação química com a água pode formar o ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esta molécula formada é responsável pela chuva ácida, fenômeno que acarreta danos à flora e à agricultura (BRAGA *et al.*, 2005).

Sendo assim, os gases CO_2 e H_2S necessitam de tratamento prévio ao seu lançamento ao meio ambiente, dadas as consequências discutidas anteriormente. Dentre as técnicas utilizadas para esta separação pode-se citar o processo de adsorção, de absorção química ou física, de membranas semipermeáveis, além das técnicas de filtração biológica e separação criogênica (ADNAN *et al.*, 2019).

Através de metodologias de tratamento de efluentes, tem-se o objetivo de transformar estes gases poluentes em compostos químicos inofensivos ao meio ambiente. Para isso, escolheu-se a metodologia que envolve o equipamento Lavador de Gases Venturi, com solução de hidróxido de sódio ($NaOH$), com a finalidade de tratar o gás carbônico oriundo da seção de purificação e de geração de energia elétrica, além de tratar do gás sulfeto de hidrogênio advindo da seção de purificação também. De acordo com a literatura, utiliza-se este reagente em concentrações

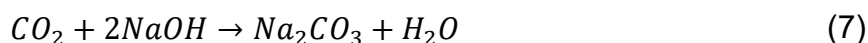
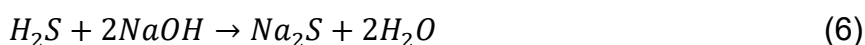
próximas a $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, em uma faixa de pH favorável a lavagem dos gases (COLTURATO *et al.*, 2016). A Figura 16 exemplifica uma torre de absorção química Venturi:

Figura 16 – Torre Venturi de absorção química



Fonte: Colturato, 2015

Assim, a corrente gasosa ao passar pelo lavador de gases e reagir com a solução de NaOH $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$, terá como produtos o sal sulfeto de sódio (Na_2S) e o sal carbonato de sódio (Na_2CO_3), além de água (H_2O), como representado nas Equações 6 e 7 (HORIKAWA, 2001).



De acordo com a Resolução nº 430 de (2011), os efluentes líquidos para que possam ser lançados na estação de tratamento de esgoto devem seguir uma série de condições e padrões. Como exemplo destes pode-se citar: pH entre 5 e 9, temperatura inferior a 40°C , presença de materiais sedimentáveis em até 1 mL.L^{-1} , concentração de óleos e graxas inferior ao limite determinado, assim como para compostos inorgânicos e orgânicos. Sendo assim, a solução resultante do lavador de gases com composição de carbonato de sódio (Na_2CO_3), sulfeto de sódio (Na_2S) e água, poderá ser lançada na estação de tratamento de esgoto municipal, de forma a não causar impactos ambientais.

Já na etapa de geração de energia, o principal poluente presente nos gases de exaustão são os óxidos de nitrogênio (NO_x), como a combustão desse processo é

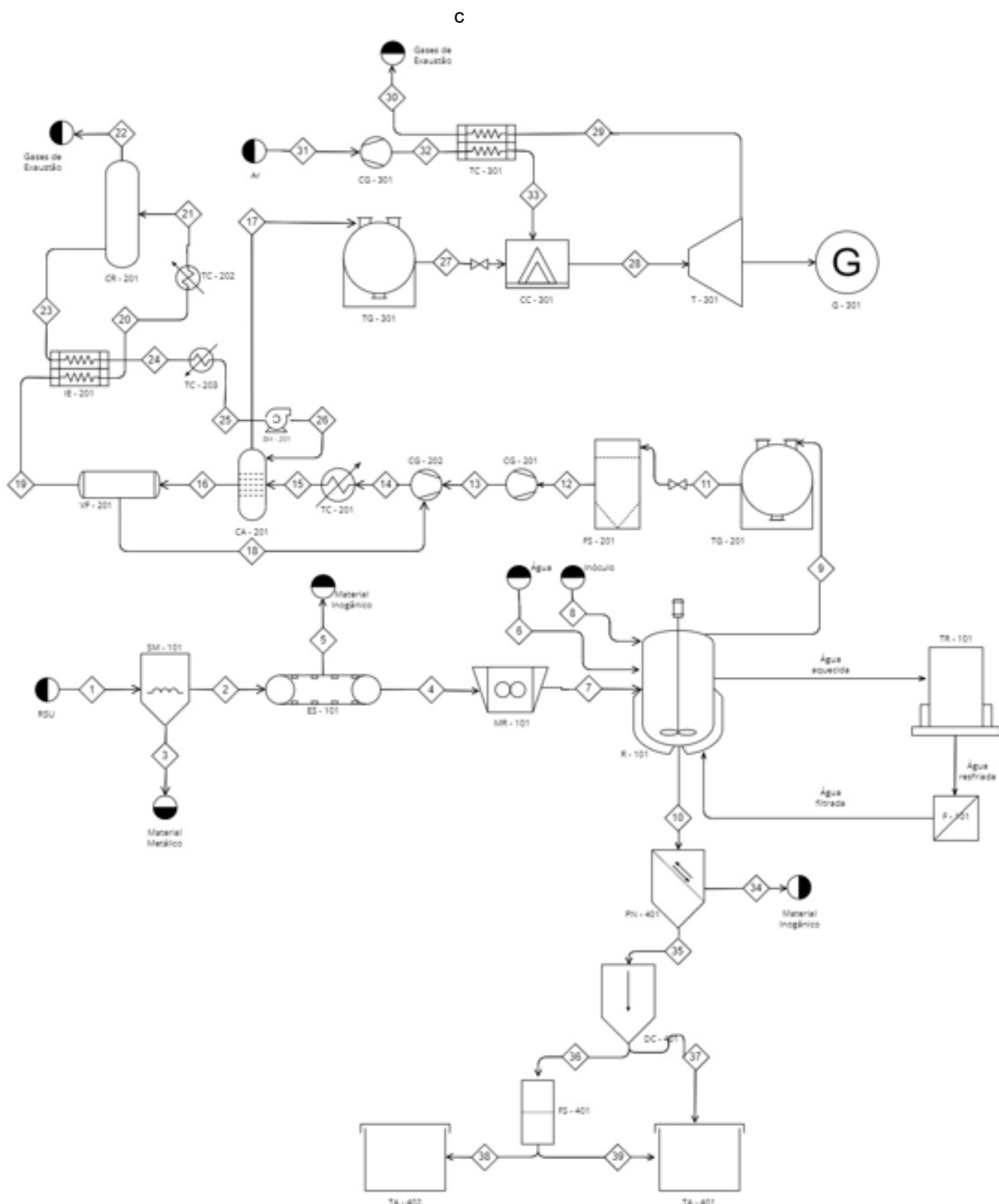
completa não é gerado monóxidos de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis. Além disso, no processo não será necessário um tratamento para os óxidos de nitrogênio, pois esses saíram do sistema com baixas emissões, sendo essa abaixo de 25 ppm. Isso se deve, pois o procedimento acontecerá com ar em excesso (CHANG *et al.*, 2019).

8 BALANÇO MATERIAL E ENERGÉTICO COM INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

Os balanços materiais e energéticos referentes ao processo produtivo de geração de energia elétrica e biofertilizantes através do biogás serão apresentados a seguir, com as descrições das vazões, frações mássicas, temperatura e pressão de cada corrente presente nos volumes de controle selecionados. Os cálculos utilizados para os balanços de massa estão apresentados no APÊNDICE A, enquanto para os balanços energéticos, no APÊNDICE B. Para ambos os balanços se considerou regime permanente e processo contínuo, sendo que para os balanços energéticos desconsiderou-se as contribuições de energia potencial e cinética.

Com a finalidade de visualização do processo como um todo, tem-se na Figura 17 o fluxograma de processo de forma simplificada, o qual apresenta as correntes de entrada e saída de cada equipamento e utilidade, sendo que o *Process Flow Diagram* (PFD) completo, com as descrições dos equipamentos está presente no APÊNDICE D. Além disso, na Tabela 3 estão apresentadas as descrições das correspondentes correntes enumeradas do processo.

Figura 17 – Fluxograma do processo



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 3 – Descrição das correntes apresentadas na Figura 17

Corrente	Descrição
1	Resíduo sólido urbano bruto (RSU)
2	RSU sem componentes metálicos
3	Metal removido do RSU
4	Material orgânico com baixa concentração de material inorgânico
5	Material inorgânico removido
6	Matéria diluída e homogeneizada
7	Água para diluição
8	Inóculo
9	Biogás produzido
10	Digestato
11	Biogás após armazenamento
12	Biogás após filtro separador
13	Biogás após 1ª compressão
14	Corrente gasosa após 2ª compressão
15	Corrente gasosa resfriada
16	Solvente carregando as impurezas
17	Biogás purificado
18	Fração de metano que retorna à absorção
19	Solvente carregando as impurezas após 1ª queda de pressão
20	Solvente carregando as impurezas após integração energética
21	Solvente carregando as impurezas após aquecimento
22	Gases de exaustão da purificação
23	Solvente regenerado
24	Solvente regenerado após integração energética
25	Solvente regenerado após resfriamento
26	Solvente regenerado após bombeamento
27	Biogás purificado após armazenamento
28	Gases de combustão
29	Gases de expansão
30	Gases de expansão após integração energética
31	Ar
32	Ar comprimido
33	Ar comprimido após integração energética
34	Material inorgânico do digestato
35	Material orgânico do digestato
36	Biofertilizante sólido com pequena parte líquida
37	Biofertilizante líquido
38	Biofertilizante sólido
39	Biofertilizante líquido

Fonte: Autoria própria (2022)

A BioG tem como objetivo a geração de energia elétrica de 85.000 kW.mês⁻¹ (equivalente a 34.884 MWh.mês⁻¹), a fim de que esta se caracterize como uma

empresa geradora de energia de médio porte. De acordo com Chang *et al.* (2019), a vazão de biogás purificada diária pode ser calculada pela Equação A2, apresentada no APÊNDICE A. Segundo França Júnior (2008), a eficiência de geração de uma turbina a gás é em torno de 0,57. Sabe-se também que o PCI (Poder Calorífico Inferior) para o gás metano é de $39,83.10^6 \text{ J.m}^{-3}$ (CHANG *et al.*, 2019) e que a fração de metano desejada, após a purificação, em (v/v) é de 0,98. Em posse destes dados, calcula-se a vazão de biogás purificado (\dot{m}_{17}), que possui o valor de $10.841,4 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, equivalente a $325.242,7 \text{ m}^3.\text{mês}^{-1}$.

A vazão volumétrica de biogás, corrente \dot{m}_{17} , é transformada em massa através da densidade e da fração mássica desejada após a purificação, por meio da Equação A3 (APÊNDICE A). Os dados utilizados para esta conversão estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de densidades e massas calculadas para os gases do biogás

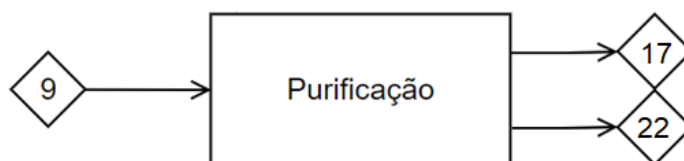
Gás	Densidade (kg.m⁻³)	Massa (ton.mês⁻¹)
CH_4	0,657	211,34
CO_2	1,833	6,54
Biogás purificado (\dot{m}_{17})	-	217,88

Fonte: Autoria própria (2022)

Com a finalidade de simplificação de cálculos posteriores, transforma-se esta vazão mássica total em termos mensais em vazão mássica em termos diários, tendo como resultado uma vazão de $7.262,6 \text{ kg.d}^{-1}$.

Para dar início aos balanços de massa do presente trabalho, faz-se necessário obter a vazão de biogás oriunda do biodigestor, para que, através da purificação, se tenha a quantidade de biogás purificado explicitada acima ($7.262,6 \text{ kg.d}^{-1}$). A partir das correntes representadas, realiza-se um balanço de massa para o metano a fim de se obter a corrente de biogás produzida no biodigestor (\dot{m}_9), relação esta apresentada na Equação A4, explicitada no APÊNDICE A. Sabe-se que a fração mássica de metano no biogás gerado na biodigestão é de 0,41, valor este obtido da literatura e explicado de forma aprofundada no tópico 8.2. Assim, o valor da corrente \dot{m}_9 é de $512,80 \text{ ton.mês}^{-1}$.

Figura 18 - Processo geral da purificação



Fonte: Autoria Própria (2022)

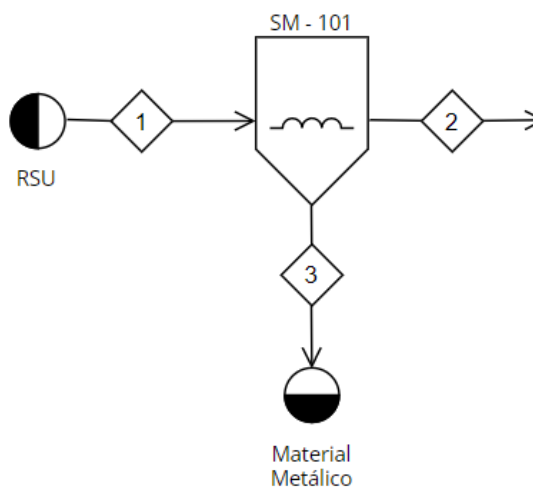
Segundo Deublein *et al.* (2011), o rendimento teórico de produção do biogás em relação ao consumo de matéria orgânica seca (MOS) é em média de $0,7 \text{ m}^3 \text{ biogás.Kg}^{-1} \text{ MOS}$. Seguindo a relação teórica e através da corrente \dot{m}_9 encontrada acima, tem-se que a vazão mássica de RSU necessária para tal produção é de $1000 \text{ ton.mês}^{-1}$. Outra referência sugere a relação de rendimento teórico do biogás em relação aos sólidos voláteis (SV) de $0,43 \text{ m}^3.\text{Kg}^{-1} \text{ SV}$ (RAHMANI *et al.*, 2022).

8.1 Setor de preparação de matéria-prima

8.1.1 Separação da matéria-prima

Segundo Colturato *et al.* (2016) o processo inicia-se com a retirada do material metálico dos resíduos, onde os mesmos são conduzidos por esteiras através de placas de ímãs. A Figura 19 representa o processo e suas correntes de entrada e saída.

Figura 19 – Separador magnético e suas correntes



Fonte: Autoria Própria (2022)

A corrente \dot{m}_1 representa o resíduo sólido bruto, essa é equivalente a 1000 ton.mês⁻¹ (valor este encontrado com base nos cálculos explicados acima), a corrente \dot{m}_2 são os materiais não metálicos e a corrente \dot{m}_3 equivale aos metais removidos pela placa de ímã. O balanço de massa global para esse processo está representado pela Equação A5.

A partir de dados da Prefeitura de Campinas (2018), foi possível obter as composições dos resíduos urbanos. Desta forma, os valores das frações referentes às composições de cada corrente e seus valores estão expressos na Tabela 5.

Realizou-se o balanço de massa para os componentes metálicos e não metálicos, sendo essa etapa representado pelas Equações A6 e A7, respectivamente.

Desta forma, foi possível obter os valores para as correntes \dot{m}_2 e \dot{m}_3 , esses também estão presentes na Tabela 5.

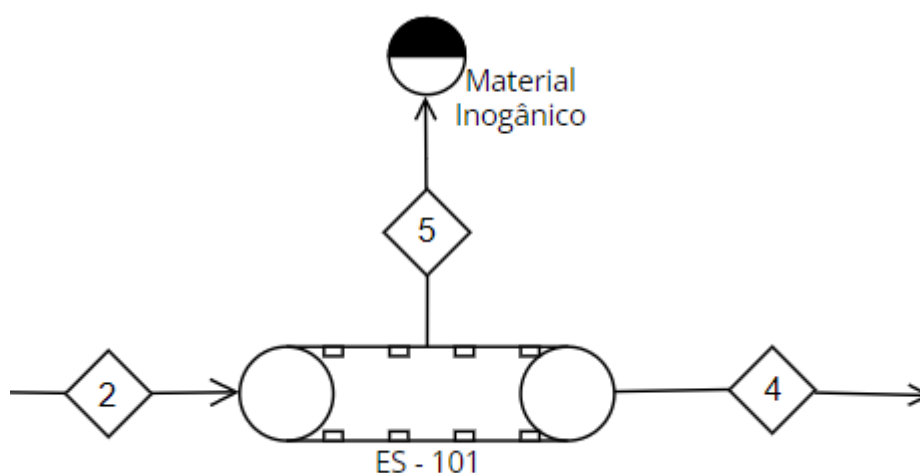
Tabela 5 – Balanço de massa da separação do material metálico

Correntes	Frações mássicas	Ton.mês⁻¹
\dot{m}_1	<i>não metálico</i> = 0,9833 <i>metálico</i> = 0,0167	1000
\dot{m}_2	<i>não metálico</i> = 1 <i>metálico</i> = 0	983,33
\dot{m}_3	<i>não metálico</i> = 0 <i>metálico</i> = 1	16,7

Fonte: Autoria Própria (2022)

Na segunda etapa da separação, novamente obtendo o conhecimento da composição geral dos resíduos sólidos urbanos de Campinas, realizou-se a separação dos componentes orgânicos e inorgânicos, presentes na corrente \dot{m}_2 , sendo esse processo representado pela Figura 20.

Figura 20 - Sistema de separação dos materiais orgânicos e suas correntes



Fonte: Autoria Própria (2022)

Neste caso, a corrente \dot{m}_2 , resultante do processo da separação por ímã, passa ser a corrente de entrada para o novo sistema, surgindo duas novas correntes de saída, \dot{m}_4 e \dot{m}_5 , em que a primeira representa a saída do material orgânico e a segunda a saída dos resíduos inorgânicos. Além disso, foi considerada uma pequena fração de material inorgânico presente na corrente \dot{m}_4 , sendo essa igual a 2,5%.

O balanço de massa global para esse processo está descrito na Equação A8, já os realizados por componentes estão nas Equações A9 e A10. Resolvendo-os, obtém-se os valores presentes na Tabela 6, juntamente com os valores das frações de cada corrente.

Tabela 6 – Balanço de massa da separação do material inorgânico

Correntes	Frações mássicas	Ton.mês ⁻¹
\dot{m}_2	<i>orgânico</i> = 0,765 <i>inorgânico</i> = 0,235	983,33
\dot{m}_4	<i>orgânico</i> = 0,975 <i>inorgânico</i> = 0,025	765,9
\dot{m}_5	<i>orgânico</i> = 0,025 <i>inorgânico</i> = 0,975	217,4

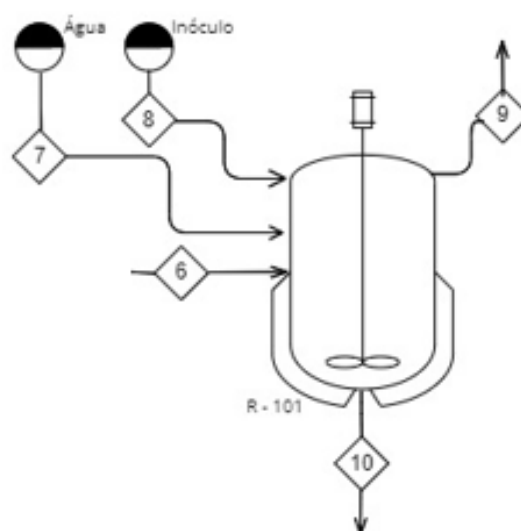
Fonte: Autoria Própria (2022)

8.2 Biodigestor

Após a separação do material orgânico, este é diluído, de forma adequada, para que ocorra uma digestão eficiente. Desta forma, é escolhido o processo úmido de biodigestão, pois caso ainda haja plásticos, esses flutuarão e poderão ser facilmente retirados do meio reacional. Para a mistura atingir seu ponto ideal de umidade, pode-se utilizar água (WU *et al.*, 2016). O teor utilizado será de 20% de materiais sólidos totais.

Desta forma, as correntes de entrada e saída do biodigestor estão apresentadas na Figura 21. Como entradas, tem-se a corrente \dot{m}_7 , a qual faz referência a água utilizada na diluição, \dot{m}_6 representando o material sólido, \dot{m}_8 como corrente representando o material biológico utilizado na digestão. Nas saídas, tem-se a corrente \dot{m}_9 de biogás e a corrente \dot{m}_{10} , a qual representa a biomassa pós digestão. Apesar do biorreator escolhido operar em regime batelada, para fins de cálculo, considera-se a representação da massa total como taxas mássicas mensais, dado que o tempo de batelada no reator é de um mês, 30 dias.

Figura 21 – Biodigestor e suas correntes



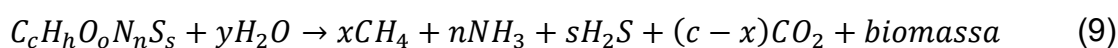
Fonte: Autoria própria (2022)

Nesta Figura 21, a corrente \dot{m}_7 tem como composições as frações mássicas da matéria sólida e matérias líquida, a corrente \dot{m}_8 possui a composição única do lodo (inóculo), a corrente \dot{m}_{10} apresenta a composição única do digestato obtido após a

digestão e a corrente \dot{m}_9 , os gases que formam o biogás, dados estes presentes na Tabela 8.

Em se tratando do biodigestor, tem-se que o balanço material para o mesmo está representado na Equação A11.

A atividade no biorreator é resultado da reação química geral apresentada na Equação 9, onde há a degradação do material orgânico na presença de água e a formação dos gases que compõe o biogás (ANUKAM *et al.*, 2019). Para uma simplificação da reação 9, tendo como matéria orgânica a glicose e como produtos metano, gás carbônico, gás sulfídrico e biomassa, de acordo com Muvhiiwa (2015), tem-se o calor de reação de 142 kJ/mol de glicose



Através das especificações dos balanços de massa anteriores, tem-se \dot{m}_7 como corrente conhecida, assim como sua composição em termos de fração mássica. Para a determinação das demais incógnitas do processo, deu-se prioridade para os dados obtidos na literatura.

Para dar início as determinações das vazões mássicas das correntes, pode-se determinar o volume de biogás purificado para que sejam produzidos a meta de 85.000 KW de energia por mês.

A composição em volume do gás produzido, tendo como substrato a matéria orgânica advinda de aterros sanitários, é uma característica amplamente estudada na literatura. De acordo com Tchobanolous *et al.* (1993), a fração de gás metano é em média de 60%, enquanto para o gás carbônico de 20% e para o gás sulfídrico e amônia 10% cada. Dado que há a semelhança entre os processos analisados, adota-se estas frações para a composição do balanço material na saída do biodigestor.

O estudo dos parâmetros bioquímicos referentes à escolha do inóculo são de suma importância para a previsão de produção do biogás. Neste trabalho foi escolhido a utilização de lodo 1º e 2º de ETE, dado sua grande disponibilidade e potencial digestivo já abordado anteriormente. O inóculo consistirá em uma cultura mista com diferentes colônias microbianas, sendo estas: bactérias heterótrofas, filamentosas e nutrificantes (VAZOLLER, 2001).

Além da caracterização microbiológica, os parâmetros físico-químicos do inóculo precisam ser obtidos também, como potencial hidrogeniônico (pH), umidade,

teor de cinzas, temperatura de digestão, sólidos voláteis (SV), dentre outros. Tais parâmetros médios para o lodo estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Características físico-químicas do lodo advindo de ETE

Característica	Valor	Referência
pH	5 a 8	Adaptado de Metcalf; Eddy (1991)
Umidade (%)	60 a 80%	Adaptado de Costa <i>et al.</i> (2014)
Teor de Cinzas (%)	30 a 50%	Adaptado de Lee (2011)
Sólidos Voláteis (%ST)	60 a 80%	Adaptado de Metcalf; Eddy (1991)
Temperatura de digestão	35 °C	Adaptado de Nuvolare <i>et al.</i> (2003)

De acordo com Araújo (2017), a relação para quantidade de inoculante frente a quantidade de RSU é de 0,25 kg de inoculante por kg de RSU. Sendo assim, para 1000 toneladas de resíduo por mês, tem-se a corrente \dot{m}_8 de 250 ton.mês⁻¹ de inoculante. Com os valores das correntes \dot{m}_6 , \dot{m}_7 , \dot{m}_8 e \dot{m}_9 em massa, pode-se calcular a corrente \dot{m}_{10} pela Equação A11, apresentada no APÊNCIDE A, obtendo o valor de 3.566,7 ton.mês⁻¹.

Através do levantamento teórico realizado ao decorrer do presente trabalho, sabe-se que a digestão anaeróbica trata-se de um conjunto de reações exotérmicas, que ocorrem a 35°C. De acordo com Muvhiiwa (2015), há a liberação de 142 kJ.mol⁻¹ de glicose, para tal conjunto de reações explicitadas na descrição do processo. Assim, por meio da realização dos cálculos apresentados no APÊNDICE B, Equação B2, tem-se que o calor liberado pela reação, o qual deverá ser absorvido pela camisa do reator, é de -31,2 kW. A Tabela 8 a seguir apresenta os dados de balanço de massa e energia do reator biológico.

Tabela 8 – Balanço de massa e energia do biodigestor

Correntes	Balanço de massa		Balanço de energia		
	Ton.mês ⁻¹	Frações mássicas	T(°C)	P(bar)	Q(kW)
\dot{m}_7	3063,6	água = 1	25	1	
\dot{m}_6	765,9	sólido = 1	25	1	
\dot{m}_8	250,0	inóculo = 1	25	1	
\dot{m}_9	512,8	$CH_4 = 0,41$	35	1	-31,2
		$CO_2 = 0,39$			
		$H_2S = 0,14$			
		$NH_3 = 0,06$			
\dot{m}_{10}	3566,7	digestato = 1	35	1	

Fonte: Autoria própria (2022)

8.2.1 Camisa de resfriamento do biodigestor

A fim de que a temperatura seja mantida constante a 35°C no reator, optou-se pela instalação de um trocador de calor na camisa do reator, de forma que a água utilizada circule pela camisa do mesmo, realizando a absorção da energia liberada na reação de formação do biogás. O balanço de energia para este equipamento de troca térmica está apresentado no APÊNDICE B. A Tabela 9 abaixo explicita as condições de operação deste equipamento referentes à utilidade utilizada (água), bem como a vazão necessária da mesma.

Tabela 9 – Balanço de massa e energia para a água da camisa de resfriamento do biodigestor

Correntes	Balanço de massa		Balanço de energia		
	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(°C)	P(atm)	Q(kW)
Trocador de Calor TC-101					
Água que entra na camisa	86.400,0	$H_2O = 1$	25	1	31,2
Água que sai da camisa	86.400,0	$H_2O = 1$	32,45	1	

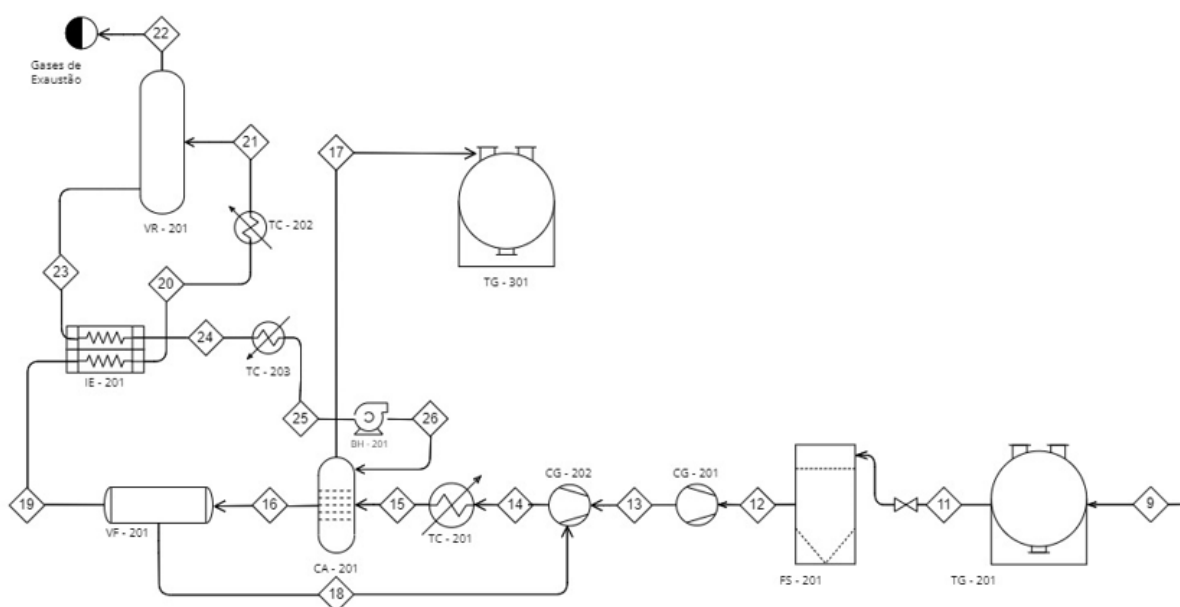
Fonte: Autoria própria (2022)

8.3 Purificação

O processo de purificação está apresentado na Figura 22, nele foram representados os equipamentos utilizados nessa parte do processo, bem como as correntes envolvidas. Assim, tem-se os gasômetros (TG-201 e TG-301), o filtro

separador (FS-201), os compressores (CG-201 e CG-202), o trocador de calor para resfriar o biogás (TC-201) e a coluna de absorção (CA-201). Além disso, tem-se o vaso *flash* (VF-201), o integrador energético (IE-201), os trocadores que serão responsáveis por finalizarem o aquecimento e resfriamento após a integração (TC-202 e TC-203), o vaso regenerador (VR-201) e a bomba hidráulica (BH-201).

Figura 22 - Processo de purificação e suas correntes



Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir da Figura 22, define-se as correntes, sendo a corrente \dot{m}_9 a do biogás, a \dot{m}_{17} o biogás purificado, \dot{m}_{22} são os gases de exaustão, \dot{m}_{16} equivalente ao solvente Selexol® e as impurezas, \dot{m}_{19} é a corrente da fração líquida que contém o solvente Selexol® e impurezas, \dot{m}_{18} é a fração gasosa, que por sua vez contém gás metano, e a corrente \dot{m}_{26} é o solvente regenerado.

Desta forma, os valores de correntes e frações de entrada e saída das operações de purificação são referentes ao biogás produzido (entrada - \dot{m}_9) e ao biogás purificado (saída - \dot{m}_{17}). Sendo os valores das frações da corrente \dot{m}_{17} são conhecidos na literatura, de acordo com Andriani *et al.* (2014), a purificação por meio da absorção física resulta-se na produção de biometano com alto grau de pureza, sendo esse de 97%, além disso, considera-se que todo o H_2S e NH_3 são removidos.

Sendo assim, serão apresentados a seguir os balanços materiais e energéticos de cada volume de controle abordado no Setor de Purificação. Para os

equipamentos TG-201, FS-201 e CG-201, não se tem variação do balanço de massa, possuindo uma vazão de 512,8 ton/mês.

8.3.1 Compressor de gás CG-201

A absorção dos gases de impurezas presentes no biogás é uma operação que ocorre de forma pressurizada. A pressão ótima da coluna de absorção, de acordo com Hoyer *et al.* (2016) é de 7 bar. Para alcançá-la escolheu-se a utilização de dois compressores, sendo o primeiro para aumentar a pressão atmosférica da corrente \dot{m}_{12} para 4 bar (\dot{m}_{13}).

O balanço de energia para esta utilidade está descrito no APÊNDICE B, sendo que as características das correntes que percorrem o equipamento estão apresentadas na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 – Balanço de massa e energia do CG-201

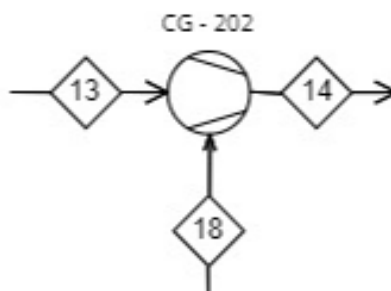
Correntes	Balanço de massa		Balanço de energia		
	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(°C)	P(bar)	Trabalho(kW)
Compressor CG-201					
\dot{m}_{12}	17.093,6	$CH_4 = 0,41$ $CO_2 = 0,39$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$	35	1	45,65
\dot{m}_{13}	17.093,6	$CH_4 = 0,41$ $CO_2 = 0,39$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$	175,44	4	

Fonte: Autoria própria (2022)

8.3.2 Compressor de gás CG-202

Este equipamento é responsável por comprimir o biogás oriundo do compressor CG-201 (\dot{m}_{13}) e a fração de metano que retorna da coluna de absorção (\dot{m}_{18}). Como corrente resultante, tem-se o biogás com maior teor de metano (\dot{m}_{14}). Tal volume de controle está apresentado na Figura 23 a seguir.

Figura 23 – Compressor de Gás CG-202 e suas correntes



Fonte: Autoria própria (2022)

Os balanços materiais deste equipamento estão presentes no APÊNDICE A, sendo que por meio do balanço global deste volume de controle, representado na Equação A12, encontrou-se a corrente \dot{m}_{14} , além de se determinar a composição da mesma pelas Equações A13, A14, A15, A16 e A17. Os resultados destes balanços estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Balanço de massa e energia do CG-202

Correntes	Balanço de massa		Balanço de energia		
	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(°C)	P(bar)	Trabalho(kW)
Compressor CG-202					
\dot{m}_{13}	17.093,60	$CH_4 = 0,41$ $CO_2 = 0,39$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$	175,44	4	
\dot{m}_{18}	352,24	$CH_4 = 0,41$ $CO_2 = 0,39$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$	25	4	25,73
\dot{m}_{14}	17.445,80	$CH_4 = 0,42$ $CO_2 = 0,38$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$	232,24	7	

Fonte: Autoria própria (2022)

8.3.3 Trocador de calor TC-201

O balanço de massa para o trocador de calor TC-201 apenas apresenta a manutenção da vazão mássica oriunda do compressor, de 17.948,30 kg.d⁻¹, bem como sua composição.

O controle da temperatura é de suma importância para diversas operações, seja para aumentar a eficiência, promover separação de fases ou oferecer um controle

de proliferação de microrganismos. Diante disso, na seção de purificação faz-se necessário a presença de trocadores de calor em três circunstâncias. A primeira destas é o resfriamento do biogás comprimido (\dot{m}_{14}) utilizando água como utilidade, pois de acordo com Hoyer *et al.* (2016), se tem uma absorção de gases por um escoamento líquido contracorrente mais eficiente em temperaturas amenas, como de 25°C.

O balanço energético para este trocador de calor está presente no APENDÊNDICE B, sendo que as características das correntes que cruzam seu volume de controle estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Balanço de massa e energia do TC-201

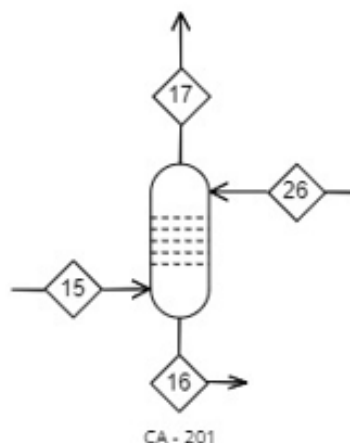
Correntes	Balanço de massa		Balanço de energia		
	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(°C)	P(bar)	Q(kW)
Trocador de Calor TC-201					
\dot{m}_{14}	17.445,80	$CH_4 = 0,42$ $CO_2 = 0,38$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$	232,24	7	-75,81
\dot{m}_{15}	17.445,80	$CH_4 = 0,42$ $CO_2 = 0,38$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$	25	7	

Fonte: Autoria própria (2022)

8.3.4 Coluna de absorção

Considerando como volume de controle a coluna de absorção, obteve-se o sistema representado na Figura 24, sendo as correntes de entrada a mistura gasosa (\dot{m}_{15}) proveniente do trocador de calor TC-201, o solvente regenerado (\dot{m}_{26}) tem-se como correntes de saída o biogás purificado (\dot{m}_{17}) e o solvente carregando as impurezas (\dot{m}_{16}). Tais correntes estão a 25°C e 7 bar.

Figura 24 - Coluna de absorção e suas correntes



Fonte: Autoria Própria (2022)

A determinação do volume de solvente necessário para a lavagem dos poluentes presentes na corrente de biogás, foi realizada por meio da Equação A24. O balanço de massa global para esse sistema está descrito pela Equação A18 e o balanço por componente pelas Equações A19, A20, A21, A22 e A23. O resultado das correntes e suas composições determinadas por meio dos balanços materiais está disposto na Tabela 13.

Tabela 13 – Balanço de massa e energia da coluna de absorção

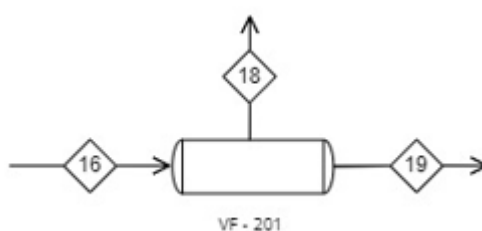
Balanço de massa		
Correntes	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas
\dot{m}_{15}	17.445,90	$CH_4 = 0,42$ $CO_2 = 0,38$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$
\dot{m}_{17}	7.262,6	$CH_4 = 0,97$ $CO_2 = 0,03$
\dot{m}_{16}	1.763.134,79	$CH_4 = 0,0002$ $CO_2 = 0,0036$ $H_2S = 0,0014$ $NH_3 = 0,0006$ $Solvente = 0,99$
\dot{m}_{26}	1.752.951,57	$Solvente = 1$

Fonte: Autoria própria (2022)

8.3.5 Vaso *flash*

O próximo volume de controle considerado foi para o equipamento vaso *flash*, sendo esse representado na Figura 25, juntamente com suas correntes, as quais estão a 25°C. Sendo a corrente de entrada o solvente contendo as impurezas (\dot{m}_{16}) proveniente da coluna de absorção, já as correntes de saída as frações líquido (\dot{m}_{19}) e vapor (\dot{m}_{18}), após sofrerem a queda de pressão.

Figura 25 - Vaso flash e suas correntes



Fonte: Autoria Própria (2022)

Os balanços de massa realizados para esse volume de controle são descritos pelas Equações A25, A26, A27, A28 e A29.

Assim, o vaso *flash* possui como finalidade apenas a redução da pressão. Isto pois, para uma absorção física na qual os gases de impurezas possuem uma alta solubilidade no solvente, quando aplicada uma queda de pressão, o metano que possui baixa solubilidade no mesmo, se vaporiza novamente, retornando ao processo de absorção (RYCKEBOSCH *et al.*, 2011). Desta forma, neste equipamento a corrente 16 entra a uma pressão de 7 bar e as correntes de saída (18 e 19) saem a 4 bar. A Tabela 14 abaixo apresenta os valores referentes às correntes obtidas através dos balanços materiais, explicitados no APÊNDICE A.

Tabela 14 – Balanço de massa e energia do vaso *flash*

Balanço de massa		
Correntes	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas
\dot{m}_{16}	1.763.134,79	$CH_4 = 0,0002$
		$CO_2 = 0,0036$
		$H_2S = 0,0014$
		$NH_3 = 0,0006$
		$Solvente = 0,99$
\dot{m}_{18}	352,24	$CH_4 = 1$
\dot{m}_{19}	1.762.782,55	$CO_2 = 0,0036$
		$H_2S = 0,0014$
		$NH_3 = 0,0006$
		$Solvente = 0,99$

Fonte: Autoria própria (2022)

Os balanços materiais para o IE-201 e o TC-202 são constantes com o valor das correntes de 1.762.782,55 kg/d, dado que estes equipamentos possuem a função de realizar mudanças de temperatura nas correntes que ultrapassam seus volumes de controle.

8.3.6 Sistema de integração energética

Após a queda de pressão presente no vaso *flash*, a corrente de solvente com gases absorvidos segue à pressão de 4 bar para o trocador de calor TC-202. Segundo Matos (2015), a operação de dessorção dos gases de um solvente ocorre pela elevação da temperatura da mistura, pois há a vaporização destes gases antes absorvidos no solvente. Sendo assim, ao se elevar a temperatura da mistura para 100°C e, em sequência, se oferecer uma queda de pressão no vaso regenerador, se tem a completa regeneração do solvente Selexol®. Esta temperatura foi escolhida de forma que fosse suficientemente elevada para causar a dessorção, sem que houvesse a vaporização do solvente.

Por fim, tem-se o trocador responsável por resfriar a corrente de solvente oriunda do vaso regenerador (TC-203), até a temperatura de 25°C. Isto pois, como dito anteriormente, a operação da coluna de absorção pode ter sua eficiência elevada caso sejam utilizadas baixas temperaturas e elevadas pressões.

Ao analisar o uso dos trocadores TC-202 e TC-203, percebe-se que se pode estudar o caso de uma integração energética entre a corrente que necessita ser resfriada e a corrente que necessita ser aquecida. O estudo de caso desta integração

energética é de suma importância para que sejam otimizados os custos com utilidades quentes e frias. Tal análise completa está descrita no APÊNDICE B, seguida do balanço de energia de cada equipamento.

Os resultados dos balanços energéticos dos trocadores de calor antes do estudo de integração energética estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Balanço de massa e energia do sistema de troca térmica sem integração energética

Correntes	Balanço de massa		Balanço de energia		
	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(°C)	P(bar)	Q(kW)
Trocador de Calor TC-202					
		<i>Solvente = 0,9944</i>			
\dot{m}_{20}	1.762.782,55	$CO_2 = 0,0036$ $H_2S = 0,0014$ $NH_3 = 0,0006$	25	4	
					3.145,08
		<i>Solvente = 0,9944</i>			
\dot{m}_{21}	1.762.782,55	$CO_2 = 0,0036$ $H_2S = 0,0014$ $NH_3 = 0,0006$	100	4	
Trocador de Calor TC-203					
\dot{m}_{24}	1.752.951,57	<i>Solvente = 1</i>	100	1	
\dot{m}_{25}	1.752.951,57	<i>Solvente = 1</i>	25	1	-3.134,62

Fonte: Autoria própria (2022)

A seguir, tem-se a Tabela 16 com os resultados do balanço de energia com integração energética.

Tabela 16 – Balanço de massa e energia do sistema de troca térmica com integração energética

Correntes	Balanço de massa		Balanço de energia		
	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(°C)	P(bar)	Q(kW)
Integrador Energético IE-201					
		<i>Solvente = 0,9944</i>			
\dot{m}_{19}	1.762.782,55	$CO_2 = 0,0036$ $H_2S = 0,0014$ $NH_3 = 0,0006$	25	4	
					9,07
		<i>Solvente = 0,9944</i>			
\dot{m}_{20}	1.762.782,55	$CO_2 = 0,0036$ $H_2S = 0,0014$ $NH_3 = 0,0006$	90	4	
\dot{m}_{23}	1.752.951,57	<i>Solvente = 1</i>	100	1	
\dot{m}_{24}	1.752.951,57	<i>Solvente = 1</i>	35	1	-9,07
Trocador de Calor TC-202					
		<i>Solvente = 0,9944</i>			
\dot{m}_{20}	1.762.782,55	$CO_2 = 0,0036$ $H_2S = 0,0014$ $NH_3 = 0,0006$	90	4	
					428,41
		$CH_4 = 0,41$			
\dot{m}_{21}	1.762.782,55	$CO_2 = 0,39$ $H_2S = 0,14$ $NH_3 = 0,06$	100	4	
Trocador de Calor TC-203					
\dot{m}_{24}	1.752.951,57	<i>Solvente = 1</i>	35	1	
\dot{m}_{25}	1.752.951,57	<i>Solvente = 1</i>	25	1	-417,95

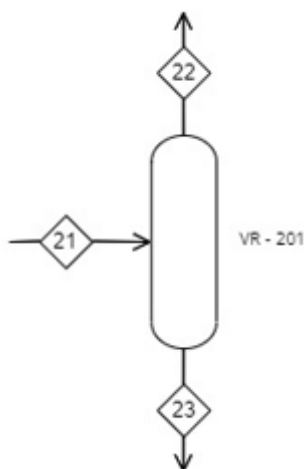
Fonte: Autoria própria (2022)

Em posse destes resultados, pode-se comparar os calores dos trocadores TC-202 e TC-203, pois em ambos os casos são os equipamentos que necessitam de utilidades. Ao se analisar o TC-202, percebe-se que sem integração energética há a necessidade de um calor de magnitude muito maior quando comparado com o mesmo trocador com integração energética. Esta discrepância representa uma economia de 86% de utilidade quente. Da mesma forma pode-se comparar o calor que deve ser retirado pelo TC-203, para um sistema com ou sem integração energética. Ao realizar tal análise, constata-se que há uma economia de 87% no uso de utilidade fria. Sendo assim, a integração energética apresenta resultados positivos, que impactarão na análise financeira do presente trabalho.

8.3.7 Vaso regenerador

Tal vaso possui a função de realizar outra queda de pressão de 3 bar, promovendo a dessorção dos gases de impurezas presentes no solvente Selexol®, regenerando o mesmo. Quando analisado o volume de controle referente ao vaso utilizado para a regeneração do solvente (VR-201), tem-se como corrente de entrada a fração líquida oriunda do trocador de calor TC-202 (\dot{m}_{21}). Na saída do vaso, tem-se a corrente de solvente regenerado (\dot{m}_{23}) bem como a corrente que contém os gases de exaustão (\dot{m}_{22}). Desta forma, a corrente 21 entra a 4 bar e as correntes de saída (22 e 23) saem a 1 bar, além de que estas estão a 100°C. Tais correntes estão apresentadas na Figura 26.

Figura 26 – Vaso regenerador do solvente e suas correntes



Fonte: Autoria própria (2022)

Com estas considerações, fez-se a análise do balanço de massa global e por componente desse volume de controle, como apresentado nas Equações A30, A31, A32, A33 e A34.

Por meio da resolução dos balanços materiais, tem-se os valores das correntes e de suas respectivas composições expressas na Tabela 17.

Tabela 17 – Balanço de massa e energia do vaso regenerador

Balanço de massa		
Correntes	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas
\dot{m}_{21}	1.762.782,55	$CO_2 = 0,0036$ $H_2S = 0,0014$ $NH_3 = 0,0006$ $Solvente = 0,99$
\dot{m}_{22}	9830,98	$CO_2 = 0,64$ $H_2S = 0,25$ $NH_3 = 0,11$
\dot{m}_{23}	1.752.951,57	$Solvente = 1$

Fonte: Autoria própria (2022)

8.3.8 Bomba hidráulica BH-201

Como já descrito anteriormente, através do levantamento de dados da literatura, considerou-se condições ótimas para a operação de absorção dos gases de impurezas presentes no biogás. Sendo assim, de forma semelhante ao processo de compressão do biogás, se faz necessário realizar o aumento da pressão da corrente de solvente regenerado para 7 bar, por meio da bomba hidráulica BH-201. O estudo energético deste processo está descrito no APÊNDICE B, sendo que o resultado desta análise está disposto na Tabela 18 abaixo.

Tabela 18 – Balanço de massa e energia da bomba hidráulica

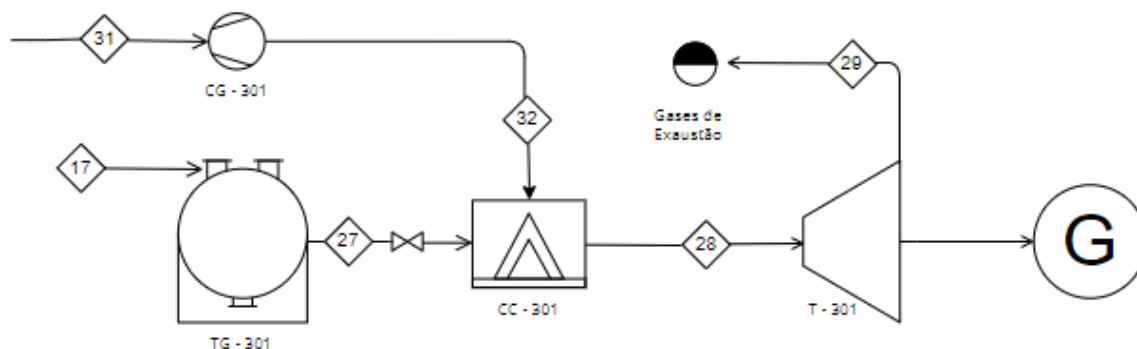
Correntes	Balanço de massa		Balanço de energia		
	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(°C)	P(bar)	Trabalho(kW)
Bomba Hidráulica BH-201					
\dot{m}_{25}	1.752.951,57	<i>Solvente</i> = 1	25	1	13,19
\dot{m}_{26}	1.752.951,57	<i>Solvente</i> = 1	25	7	

Fonte: Autoria própria (2022)

8.4 Geração de energia

Para a reação de combustão do biometano e a geração de energia elétrica, a BioG utilizará uma turbina a gás acoplada a um gerador elétrico. A seção de geração de energia está descrita na Figura 27, onde, há a entrada do ar (\dot{m}_{31}), sendo esse comprimido, resultando na corrente \dot{m}_{32} . Na câmara de combustão juntamente com o combustível biogás (\dot{m}_{17}) já purificado, a partir da reação de combustão ocorrerá a expansão dos gases (\dot{m}_{19}), que por sua vez contribuem para o funcionamento da turbina. A corrente de saída (\dot{m}_{29}) consiste nos gases de exaustão (OKOROIGWE; MADHLOPA, 2015).

Figura 27 - Processo geral da geração de energia e suas correntes



Fonte: Autoria Própria (2022)

Sendo a fração de NO_2 que poderá estar presente na corrente de saída \dot{m}_{30} , mínima (CHANG *et al.*, 2019).

Todos os cálculos e balanços de massa realizados, sendo o volume de controle global da geração de energia, estão descritos de forma detalhada no APÊNDICE A, por meio das Equações A35, A36, A37 e A38, além das demais considerações.

O Balanço de energia desse volume de controle está descrito no APÊNDICE B, a partir das Equações B3, B4, B5 e B6. Os resultados do balanço material e energético estão dispostos na Tabela 19.

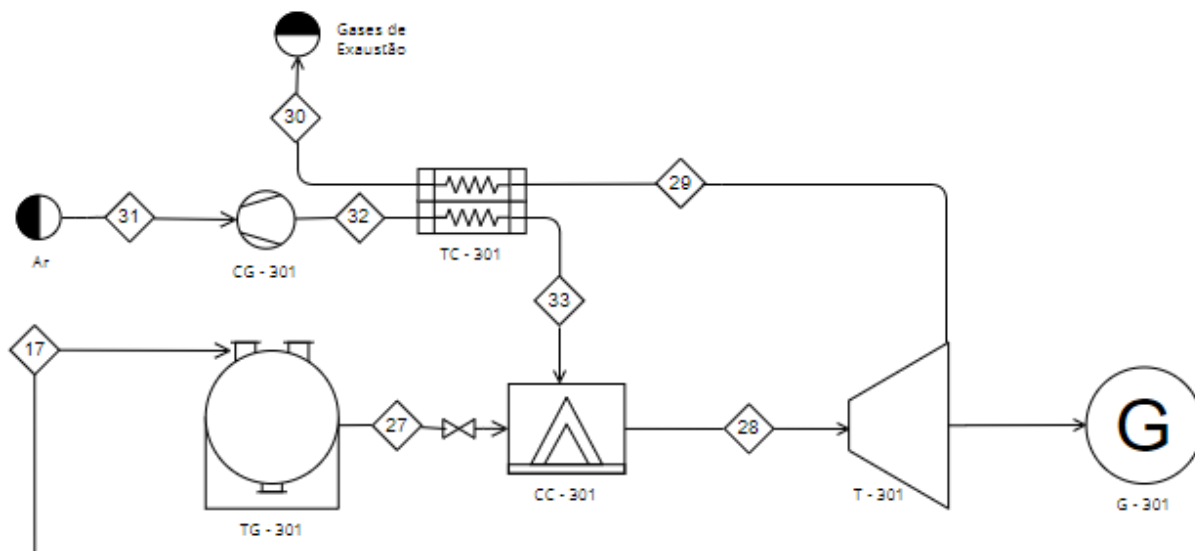
Tabela 19 - Balanço de massa e de energia para a geração de energia

Balanço de massa			Balanço de energia			
Correntes	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(K)	P(atm)	Trabalho (kW)	Calor (kW)
Compressor CG-301						
\dot{m}_{31}	139.075,1	$O_2 = 0,23$ $N_2 = 0,76$	300	1	393,73	-
\dot{m}_{32}	139.075,1	$O_2 = 0,23$ $N_2 = 0,76$	543,43	8		
Câmara de combustão CC-301						
\dot{m}_{32}	139.075,1	$O_2 = 0,23$ $N_2 = 0,76$	543,43	8	-	1.112,7
\dot{m}_{28}	146.337,7	$N_2 = 0,72$ $CO_2 = 0,13$ $H_2O = 0,11$ $NO_2 = 0,04$	1.231,39	8		
\dot{m}_{27}	7.262,6	$CH_4 = 0,97$ $CO_2 = 0,03$	-	-	-	-
Turbina T-301						
\dot{m}_{28}	146.337,7	$N_2 = 0,72$ $CO_2 = 0,13$ $H_2O = 0,11$ $NO_2 = 0,04$	1.231,39	8	-1.296,04	-
\dot{m}_{29}	146.337,7	$N_2 = 0,72$ $CO_2 = 0,13$ $H_2O = 0,11$ $NO_2 = 0,04$	679,78	1		

Fonte: Autoria Própria (2022)

A eficiência de geração de potência, calculada no APÊNDICE B, equivale a 0,29; para melhorá-la, uma alternativa é aumentar a temperatura na qual o calor é absorvido, e conseqüentemente, o trabalho que será gerado aumenta, pode-se aplicar uma integração energética, assim como segue a Figura 28.

Figura 28 - Processo geral da geração de energia com integração energética



Fonte: Autoria Própria (2022)

Como os gases de exaustão estão extremamente aquecidos após a expansão, é possível aproveitar essa energia em um trocador de calor regenerativo, ao se pré-aquecer os gases antes de entrar na câmara de combustão, é possível gerar mais trabalho. Neste caso, o balanço de energia seguiu o ciclo Brayton regenerativo, descrito no APÊNDICE B.

Os resultados do balanço energético, pós integração energética, estão descritos na Tabela 20, juntamente com os valores do balanço mássico.

Tabela 20 - Balanço de massa e de energia com integração energética

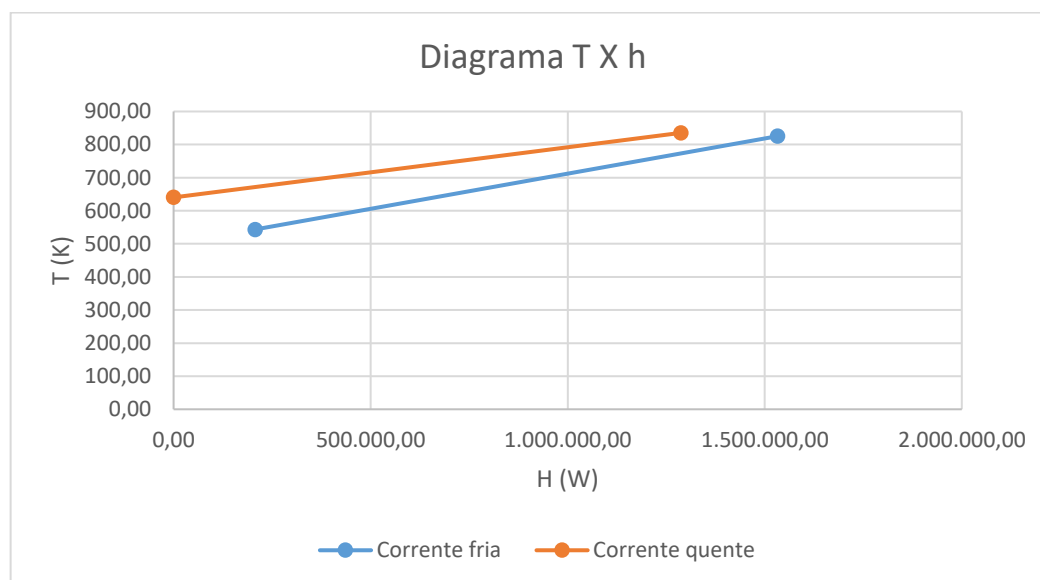
Balanço de massa			Balanço de energia			
Correntes	Kg.d ⁻¹	Frações mássicas	T(K)	P(atm)	Trabalho (kW)	Calor (kW)
Compressor CG-301						
\dot{m}_{31}	139.075,1	$O_2 = 0,23$ $N_2 = 0,76$	300	1	393,73	
\dot{m}_{32}	139.075,1	$O_2 = 0,23$ $N_2 = 0,76$	543,43	8		
Trocador de calor regenerativo TC-301						
\dot{m}_{32}	139.075,1	$O_2 = 0,23$ $N_2 = 0,76$	543,43	8		456,2
\dot{m}_{33}	139.075,1	$O_2 = 0,23$ $N_2 = 0,76$	825,48	8		
\dot{m}_{29}	146.337,7	$N_2 = 0,72$ $CO_2 = 0,13$ $H_2O = 0,11$ $NO_2 = 0,04$	835,48	1		662,7
\dot{m}_{30}	146.337,7	$N_2 = 0,72$ $CO_2 = 0,13$ $H_2O = 0,11$ $NO_2 = 0,04$	640,30	1		
Câmara de combustão CC-301						
\dot{m}_{32}	139.075,1	$O_2 = 0,23$ $N_2 = 0,76$	543,43	8		1.568,9
\dot{m}_{28}	146.337,7	$N_2 = 0,72$ $CO_2 = 0,13$ $H_2O = 0,11$ $NO_2 = 0,04$	1.513,44	8		
Turbina T-301						
\dot{m}_{28}	146.337,7	$N_2 = 0,72$ $CO_2 = 0,13$ $H_2O = 0,11$ $NO_2 = 0,04$	1.513,44	8		-1.592,9
\dot{m}_{29}	146.337,7	$N_2 = 0,72$ $CO_2 = 0,13$ $H_2O = 0,11$ $NO_2 = 0,04$	835,48	1		

Fonte: Autoria Própria (2022)

A eficiência de geração do ciclo de potência aumentou de 0,29 para 0,35, isso se deve ao fato de que quando há o aumento na temperatura do ciclo, ocorre um maior aproveitamento do sistema, houve o aumento do trabalho e, conseqüentemente, da eficiência.

Para melhor ilustrar a quantidade de calor reaproveitada, montou-se um diagrama Temperatura versus Entalpia, representado na Figura 29.

Figura 29 – Relação entre a temperatura e a Entalpia do sistema de integração energética



Fonte: Autoria Própria (2022)

O diagrama T *versus* H, mostra a corrente quente (vermelho) e a corrente fria (azul), a corrente quente inicia-se a uma temperatura de 640,3 K até a temperatura de 835,48 K, ela demonstra a quantidade de energia que não seria utilizada proveniente dos gases de exaustão, caso não houvesse a integração energética, que seria de 1.287,3 kW. Com a aplicação da integração, a parte não utilizada dessa entalpia é apenas a diferença entre o início das duas correntes, ou seja, a energia não utilizada diminuiu para um valor de 206,5 kW.

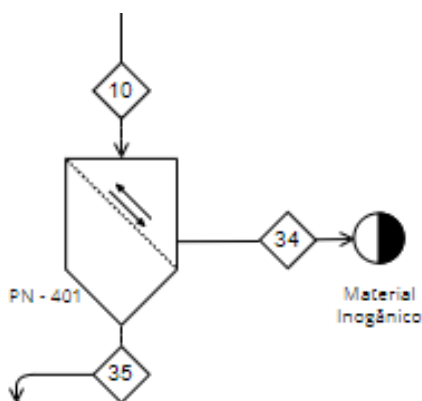
8.5 Tratamento para obtenção do biofertilizante

Após o processo de produção de biogás, o digestato resulta em matéria-prima para a produção de biofertilizantes, tanto a parte líquida quanto a sólida.

Nesta etapa, é necessário realizar a separação da matéria sólida e da matéria líquida, retirando as impurezas do processo, para então poder ser feita a comercialização dos fertilizantes.

A primeira etapa desta separação é retirar os eventuais materiais inorgânicos que não são retidos na entrada do processo. Para isso é feito um peneiramento da lama, ou seja, do digestato logo na saída do biodigestor, seguido pela Figura 30.

Figura 30 - Peneira e suas correntes



Fonte: Autoria Própria (2022)

Sendo a corrente \dot{m}_{10} o digestado proveniente do biodigestor, \dot{m}_{34} a saída de matéria inorgânica e \dot{m}_{35} a corrente do material orgânico peneirado que será encaminhado para a próxima etapa do processo para tornar-se o biofertilizante.

Os balanços para esse primeiro filtro estão descritos nas Equações A39, A40 e A41. Os valores encontrados estão expressos na Tabela 21.

Tabela 21 – Balanço de massa do peneiramento

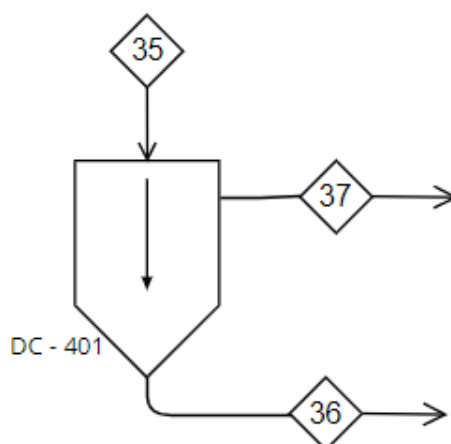
Correntes	Ton.mês ⁻¹	Frações	(m/m)
\dot{m}_{10}	3566,7	<i>inorgânica</i>	0,025
		<i>orgânica</i>	0,975
\dot{m}_{34}	82,9	<i>inorgânica</i>	1
\dot{m}_{35}	3477,5	<i>orgânica</i>	1

Fonte: Autoria Própria (2022)

Pode-se assumir que toda matéria orgânica sairá do processo como biofertilizante sólido e líquido, porém são necessários mais processos para a separação total. Desse modo, optou-se por uma decantação seguida de uma filtração.

Portanto, nessa etapa de decantação, é recuperado 72% de material líquido da corrente de material orgânico e 28% representam a lama espessa, esse esquema é representado na Figura 31.

Figura 31 - Decantador e suas correntes



Fonte: Autoria Própria (2022)

As correntes são definidas como \dot{m}_{37} sendo o biofertilizante líquido e \dot{m}_{36} a corrente que irá para o filtro, sendo majoritariamente constituído pela parte sólida e possuindo uma pequena parte líquida, ou seja, a lama espessa.

Resultando nos balanços de massa das Equações A42, A43 e A44.

Sendo assim, os valores obtidos estão descritos na Tabela 22.

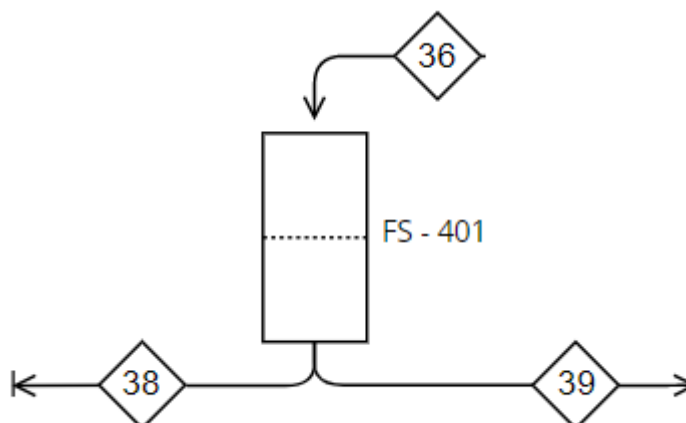
Tabela 22 – Balanço de massa do decantador

Correntes	Ton.mês ⁻¹	Frações	(m/m)
\dot{m}_{35}	3477,5	<i>líquido</i>	0,72
		<i>lama espessa</i>	0,28
\dot{m}_{36}	973,7	<i>lama espessa</i>	1
\dot{m}_{37}	2503,8	<i>líquido</i>	1

Fonte: Autoria Própria (2022)

O filtro é, então, alimentado pela corrente \dot{m}_{36} e possui as correntes de saída \dot{m}_{38} contendo o biofertilizante sólido final e \dot{m}_{39} sendo o biofertilizante líquido, assim como ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Separação final das frações de biofertilizantes



Fonte: Autoria Própria (2022)

Com isso, realizou-se os balanços de massa apresentados pelas Equações A45, A46 e A47. Obtendo-se os valores apresentados na Tabela 23.

Considerou-se que a corrente \dot{m}_{38} representa o biofertilizante sólido final, correspondendo a 71,5% da corrente \dot{m}_{36} , e a corrente \dot{m}_{39} o biofertilizante líquido, composta por 28,5% da corrente \dot{m}_{36} .

Tabela 23 - Valores das correntes e frações do filtro

Correntes	Ton.mês ⁻¹	Frações	(m/m)
\dot{m}_{36}	973,7	<i>líquida</i>	0,285
		<i>sólida</i>	0,715
\dot{m}_{38}	695,5	<i>sólida</i>	1
\dot{m}_{39}	278,2	<i>líquida</i>	1

Fonte: Autoria Própria (2022)

Posteriormente, os biofertilizantes separados em frações sólidas e líquidas são transportados em reservatórios de armazenamentos. As correntes \dot{m}_{37} e \dot{m}_{39} são encaminhadas para o tanque de armazenamento TA-401 com a presença de apenas biofertilizante líquido e a corrente \dot{m}_{38} segue no tanque TA-402 com biofertilizante sólido.

9 DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Os cálculos do dimensionamento de alguns equipamentos estão descritos no APÊNDICE C, determinados equipamentos não precisaram de cálculos, mas por meio de volume, vazão, pressão e entre outras especificações, foi possível encontrar as características deste.

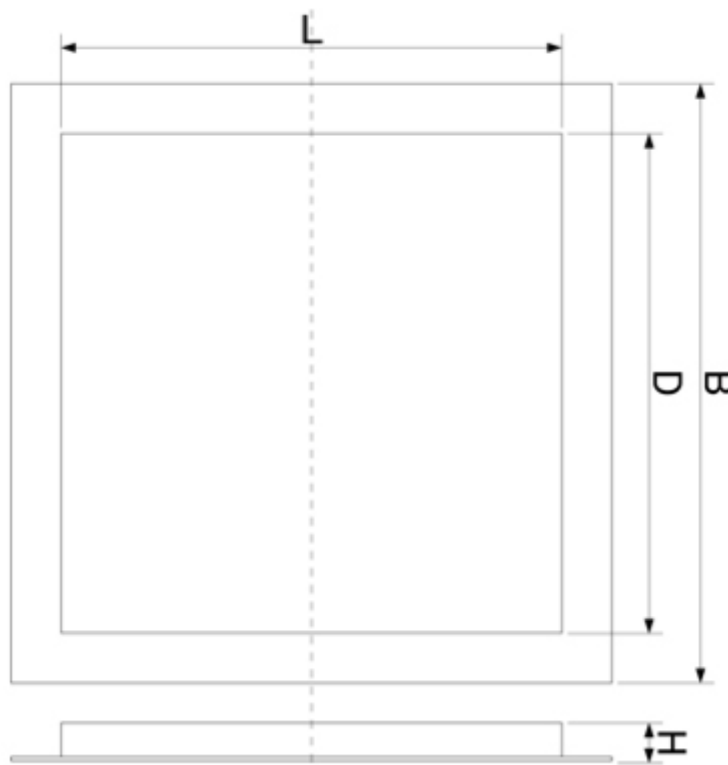
9.1 Setor 100: Obtenção do biogás

9.1.1 Separador magnético

O separador magnético, conhecido também como placa de imã, o material dessa será de neodímio, que possui uma quantidade surpreendente de força magnética e são capazes de levantar mais de 1.000 vezes o seu próprio peso (IMASHOP, 2021). Desta forma, a placa escolhida é uma MPC 50, que possui um peso equivalente a 120 kg, o material que será levantado, corrente m_3 (material metálico), possui um valor de 16700 kg, sendo necessária, aproximadamente, 140 vezes passagens na placa do material total de entrada.

Suas dimensões estão apresentadas na Tabela 24 e Figura 33.

Figura 33 - Ilustração das dimensões do separador magnético



Fonte: Magfine Srl (2016)

Tabela 24 - Dimensões do separador magnético

Dimensões	Valores (mm)
L	500
B	550
H	60
D	500

Fonte: Magfine Srl (2016)

9.1.2 Esteira de separação

A esteira para separação manual possui um comprimento de 20 m, capacidade de 70 kg.m^{-1} e velocidade equivalente a 20 m.min^{-1} , sendo capaz de suportar 672 toneladas para 8 horas trabalhadas no dia. O material orgânico possui um valor de 983,3 toneladas por mês, em dois dias todo o material já terá sido separado (DEMAKINE, 2022).

9.1.3 Moinho de rolos

O moinho de rolos será o equipamento utilizado para triturar o material orgânico antes deste ser encaminhado para o biodigestor. A vazão do MO é equivalente a $765,9 \text{ ton.mês}^{-1}$. A capacidade do equipamento é de 16 t/h, desta forma, em dois dias todo o material orgânico já estará pronto para seguir no processo. As dimensões estão apresentadas na Tabela 25 (NATREB, 2022)

Tabela 25 - Dimensões moinho de rolos

Dimensões	Valores (m)
Altura	1,8
Largura	2,07
Comprimento	2,39
Diâmetro cilindro	0,5

Fonte: Natreb (2022)

9.1.4 Biodigestor

Os cálculos para obter o volume do biodigestor estão apresentados no APÊNDICE C – C1. Desta forma, o volume total é equivalente a 6.000 m^3 , optou-se por utilizar dois biodigestores de 3.000 m^3 . Com isso, as dimensões desse equipamento são de 26,18 m de diâmetro e 5,575 m de altura (ARAÚJO et al., 2015).

Este reator trocará calor com um trocador de calor, que necessitará de uma área de troca térmica igual a $28,6 \text{ m}^2$.

9.1.5 Torre de resfriamento

A torre de resfriamento é um equipamento de utilidade, que será utilizada para resfriar a água proveniente do trocador de calor que encamisa o biodigestor, essa terá uma altura de 6,0 m, para que a água volte a obter uma temperatura de 25°C .

Os cálculos para obter a dimensão desse equipamento está presente no APÊNDICE C – C1.

9.1.6 Sistema de filtração de água

O sistema de filtração ocorre por meio de um filtro de carvão ativado, uma vez que nesse setor é para a água proveniente do resfriamento, para uma alta filtragem, com uma vazão de 4.500 L.h^{-1} , pois a vazão estipulada de água equivale a 1 kg.s^{-1} , transformando para a mesma unidade tem-se uma vazão de água de 3.600 L.h^{-1} , as dimensões estão dispostas na Tabela 26 (FUSATI, 2022).

Tabela 26 - Dimensões do sistema de filtração de água

Dimensões	Valores (m)
Altura	1,5
Largura	0,65
Altura cilíndrica	1
Diâmetro	0,5

Fonte: Fusati (2022)

9.1.7 Gasômetro

Após a produção do biogás serão necessários dois gasômetros, com 10.000 m^3 cada, uma vez que o volume produzido equivale a $14.200 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$. Segundo a Sebrae (2018), precisa-se de uma margem de segurança de aproximadamente 40% da quantidade total, desta forma, cada gasômetro trabalhará com $7.100 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$.

De acordo com o Zorg Biogás (2022), para o volume determinado, o diâmetro será de 15 m.

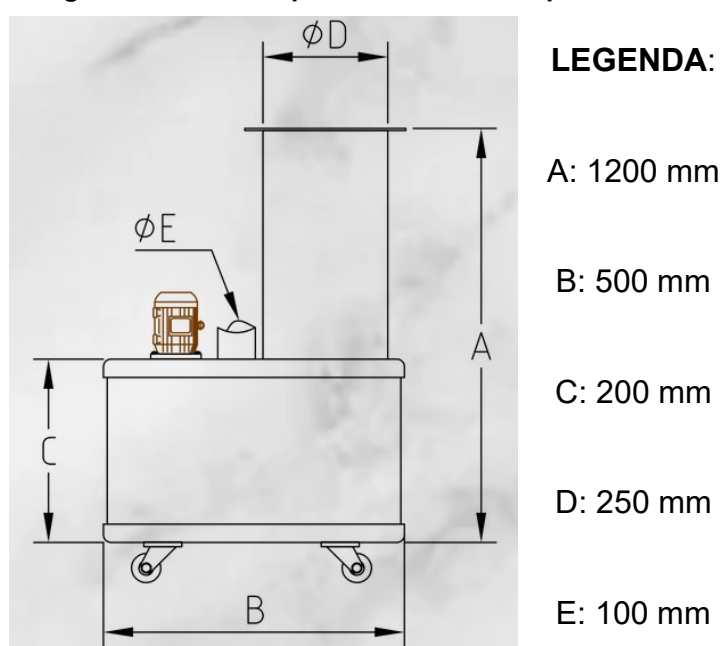
9.2 Setor 200: Purificação do biogás

9.2.1 Filtro separador

A purificação do gás combustível tem início com o controle da vazão do primeiro gasômetro, utilizado para armazenar todo biogás produzido nos 30 dias de digestão anaeróbica. Em seguida, optou-se pela instalação de um filtro separador na tubulação, a fim de que qualquer Material Particulado (MP) fique retido no mesmo, não passando para as demais etapas da purificação e, evitando qualquer interferência.

Desta forma, escolheu-se das opções no mercado um filtro separador de MP presente em correntes gasosas, com eficiência para partículas superiores a $0,4 \mu m$, granulometria esta que atende as necessidades do processo. Para a escolha do modelo do equipamento, analisou-se a vazão de biogás que passa pelo mesmo, sendo esta de $744,63 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Em posse desta vazão, encontrou-se o filtro apresentado na Figura 34, fabricado em aço inox e com vazão máxima de $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (EXAUSFIBRA, 2022).

Figura 34 – Filtro separador de material particulado



Fonte: Exausfibra (2022)

9.2.2 Compressores

Outra categoria de equipamentos a serem dimensionados são os compressores, utilizados para comprimir o biogás até a pressão de operação da coluna de absorção. Para encontrar o dispositivo que melhor se encaixasse no processo, duas variáveis foram analisadas: a vazão volumétrica de gás e a variação de pressão desejada. Como já dito anteriormente, a vazão de biogás é de $744,63 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, sendo que para os dois compressores (CG-201 e CG-202) a variação de pressão é de 3 bar.

Com base nestas especificações, escolheu-se 2 unidades do compressor representado na Figura 35, o qual apresenta vazão máxima permitida de $1290 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e uma variação de pressão de 3,5 bar. Tal compressor possui como material de sua

carcaça ferro dúctil, com rotores em aço forjado e componentes internos com revestimentos contra corrosão (AERZEN, 2022).

Figura 35 – Compressor para sistema de compressão do biogás



Fonte: Aerzen (2022)

9.2.3 Trocadores de calor

Para a escolha do trocador que melhor se adequa as necessidades do processo, precisa-se calcular a área de troca térmica e determinar a vazão de utilidade necessária. Tais cálculos estão presentes no APÊNDICE C, tendo seus resultados expressos na Tabela 27 a seguir. Para tais utilizações, escolheu-se trocadores de calor do tipo casco tubo.

Tabela 27 - Dimensionamento dos trocadores de calor do Setor 200

Equipamento	Área (m²)	Vazão de utilidade (kg.d⁻¹)
TC-201	3,78	18.000,00
TC-202	276,86	16.597,20
TC-203	494,61	4.319.473,96
IE-201	5,34	0

Fonte: Aatoria própria (2022)

9.2.4 Coluna de absorção

Ademais, precisa-se dimensionar a coluna de absorção utilizada para a absorção dos gases carbônico, sulfídrico e amônia, do biogás oriundo da biodigestão. Com a finalidade de se ter o maior contato entre a fases gasosa e líquida (solvente

Selexol®), optou-se por uma coluna de pratos, com escoamento em contracorrente. Os cálculos explicativos deste dimensionamento estão presentes no APÊNDICE C, sendo que tais características calculadas estão apresentadas na Tabela 28 a seguir.

Tabela 28 – Dimensionamento da coluna de absorção

Altura (m)	Diâmetro (m)	Número de Pratos
2,5	1	4

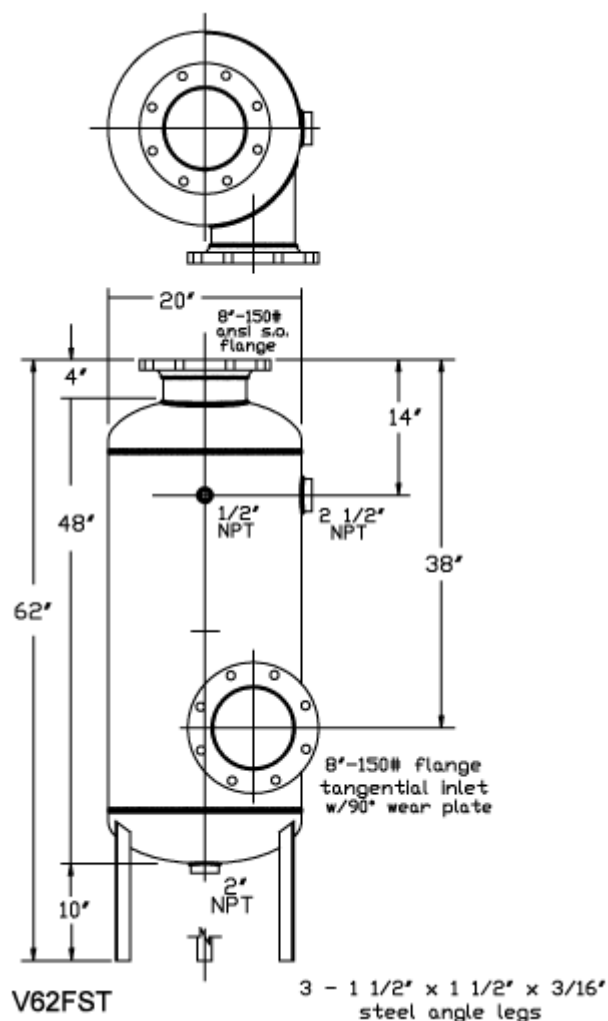
Fonte: Autoria própria (2022)

9.2.5 Vaso *flash*

O vaso *flash* possui a função de aplicar uma queda de pressão de 3 bar, a fim de que o gás metano absorvido no solvente se vaporize novamente, retornando para a coluna de absorção. Isto ocorre pois o gás metano possui menor solubilidade no Selexol® quando se comparado com os demais gases de impurezas – gás sulfídrico, gás carbônico e amônia.

Desta forma, para determinar as dimensões do vaso ideal para este processo, analisou-se a vazão mássica de entrada – de 1.763.637,23 kg.d⁻¹ – e a queda de pressão desejada – de 7 para 4 bar. Como esta vazão mássica é expressiva, divide-se a mesma em 5, sendo necessários então 5 equipamentos separadores. Com base nestas condições operacionais, escolheu-se o vaso com dimensões apresentadas na Figura 36, onde sabe-se que 1 in corresponde a 2,54 cm.

Figura 36 – Vaso *Flash* para separação do gás metano



Fonte: Cemline (2022)

9.2.6 Vaso regenerador

Outro equipamento que possui semelhança ao anterior, é o Vaso Regenerador. Este vaso tem a finalidade de vaporizar os gases de impurezas absorvidos no Selexol®, por meio de uma queda de pressão de 3 bar. Desta forma, a corrente já aquecida, ao sofrer esta queda de pressão, apresenta a separação do gás carbônico, sulfídrico e amônia, de forma que o solvente regenerado retorne ao processo de absorção. Para este vaso, tem-se uma vazão mássica de 1.762.782,55 kg.d⁻¹, sendo necessário a divisão da mesma em 5 correntes, para que se tenha 5 vasos regeneradores. Dado que há grande semelhança entre as condições de operação entre os vasos *flashs* e os vasos regeneradores, estes terão as mesmas dimensões, representadas na Figura 36.

9.2.7 Bomba hidráulica

Para elevar a pressão do solvente regenerado de 1 para 7 bar – pressão de operação da coluna de absorção – é necessário a instalação de uma bomba. Nesta operação, tem-se uma vazão volumétrica de Selexol® de $70.912,28 \text{ L.h}^{-1}$, e para desempenhar esta função, escolhe-se a utilidade apresentada na Figura 37. Esta é uma bomba rotativa de lóbulos, confeccionada em aço inoxidável, para uma pressão de operação de até 15 bar, com diâmetro de 28 mm (LEWA, 2022).

Figura 37 – Bomba para o solvente regenerado



Fonte: LEWA (2022)

9.2.8 Gasômetro

O biogás oriundo do processo de purificação necessita ser armazenado, para que posteriormente seja encaminhado para o Setor 300. Este armazenamento é feito em equipamentos chamados de gasômetros, os quais são dimensionados de acordo com o regime de operação da geração de energia elétrica. Como para este processo escolheu-se o regime de operação em horário de ponta, não há a necessidade de considerar uma volumetria diária com elevado fator de segurança.

Sendo assim, sabe-se de acordo com os balanços materiais realizados, que se tem uma vazão de biogás purificado de $10.841,44 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Para esta vazão, optou-se pela escolha de 2 gasômetros de 6.152 m^3 de volume útil, com dupla membrana que apresenta proteção contra fatores climáticos. A Figura 38 explicita a configuração destes equipamentos.

Figura 38 – Gasômetro de armazenamento do biogás purificado



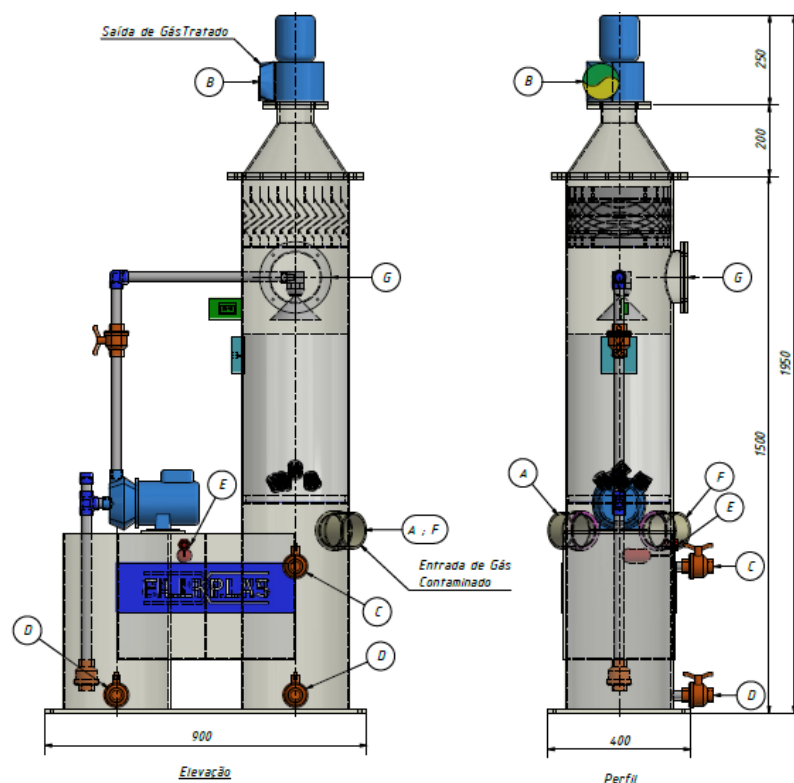
Fonte: Zorg Biogas (2022)

9.2.9 Lavador Venturi

Para finalizar os dimensionamentos do Setor 200, tem-se que determinar as características físicas do Lavador Venturi utilizado para tratar os gases de exaustão da purificação. Este equipamento realiza o contato entre a corrente gasosa e uma solução de hidróxido de sódio $0,05 \text{ M}$, a fim de que os gases (carbônico e sulfeto de hidrogênio) sejam convertidos em sais, como descrito nas reações apresentadas nas Equações 6 e 7. Por meio dos cálculos apresentados no APÊNDICE C, viu-se que o volume dos gases de exaustão era de $285,13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, optando-se então por um lavador

que atenda a uma vazão de gás de até $300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, sendo que suas dimensões estão apresentadas na Figura 39 e na Tabela 29.

Figura 39 – Lavador de gases Venturi



Fonte: Filkplas (2022)

Tabela 29 – Dimensões do Lavador de gases Venturi

Dados dos Bocais			
Bocal	Descrição	Dimensão (cm)	Observação
A	Entrada de gás	10,16	Liso
B	Saída de gás	10,16	Liso
C	Coleta de Suspensão	1,27	Rosca BSP
D	Drenagem (2)	1,91	Rosca BSP
E	Entrada de Água	1,27	c/ Boia
F	Entrada de Ar	10,16	Liso Vide Notas
G	Visor $\varnothing 140$ (acesso bico)	2,54	Acrílico

Fonte: Adaptado de Filkplas (2022)

Além disso, por meio da estequiometria das reações, pôde-se calcular o volume de solução de NaOH 0,05 M necessário para o tratamento dos gases, sendo este de $358,70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

9.3 Setor 300: Geração de energia elétrica

9.3.1 Sistema de turbina a gás

A turbina utilizada na geração de energia já contém o compressor acoplado, sendo escolhida a de ciclo simples. Além disso, optou-se por uma saída de potência bruta de até 117 MW. As dimensões estão descritas na Tabela 30 (SIEMENS ENERGY, 2022).

Tabela 30 - Dimensões do sistema de turbina a gás

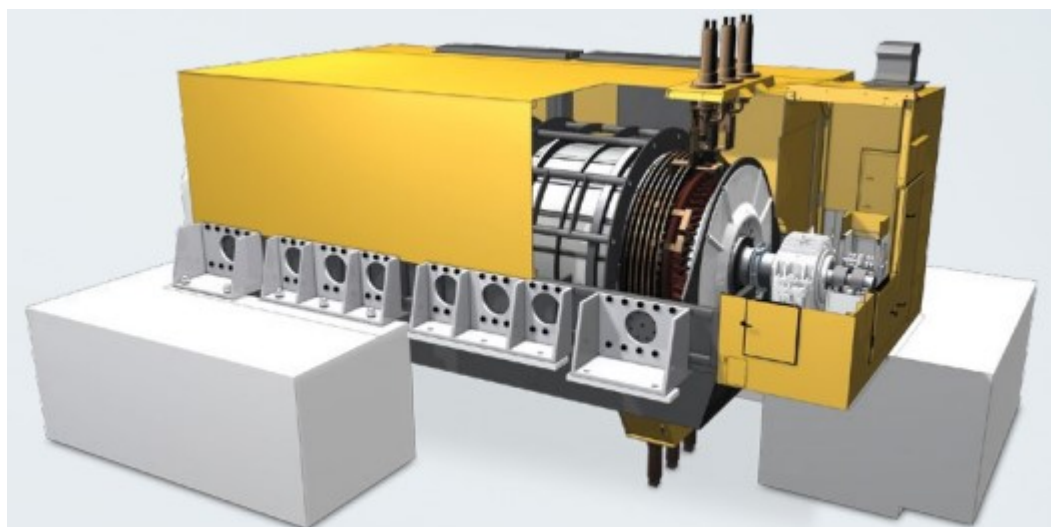
Dimensões	Valores (m)
Altura	3,3
Largura	3,3
Comprimento	9,1

Fonte: Siemens Energy (2022)

9.3.2 Gerador

O Gerador utilizado precisará de um poder aparente de 85 MVA, pois a relação potência (MW) e MVA é 1:1. Desta forma, a série SGen-100A-2P, com 25 a 180 MVA, é otimizada para aplicações industriais. Segue uma ilustração na Figura 40.

Figura 40 - Gerador de energia em escala industrial



Fonte: Siemens Energy (2022)

9.3.3 Trocador de calor – regenerador

O trocador de calor desse setor, é proveniente da integração energética. Os cálculos para encontrar a área de troca térmica estão dispostos no APÊNDICE C – C3. Desta forma, encontrou-se uma área equivalente a 47,7 m².

9.4 Setor 400: Obtenção do biofertilizante

9.4.1 Peneira

A vazão do processo equivale a 4.282,03 L.h⁻¹, calculada no APÊNDICE C – C4. Para essa vazão, a peneira possui um tamanho de abertura igual a 100 μm , com contagem de malha de 150 μm , além de possuir um diâmetro de 600 mm. A Figura 41, ilustra esse equipamento (RUSSELL, 2022).

Figura 41 - Peneira para separação do material orgânico e inorgânico



Fonte: Russell (2022)

9.4.2 Decantador

O decantador, apresentado na Figura 42 deverá suportar uma vazão de 4,2 m³.h⁻¹, como calculado no APÊNDICE C – C4. Desta forma, o equipamento selecionado possui uma capacidade de 4 a 15 m³.h⁻¹, suas dimensões estão descritas na Tabela 31 (ZK SEPARATION, 2022).

Figura 42 - Decantador



Fonte: ZK Separation (2022)

Tabela 31 - Dimensão do decantador

Dimensões	Valores (m)
Altura	3,7
Largura	1,05
Comprimento	1,2

Fonte: ZK Separation (2022)

9.4.3 Filtro separador

A escolha do filtro separador ideal para a operação de separação sólido-líquido, da lama espessada oriunda do decantador, se deu pela avaliação da vazão volumétrica que percorreria tal equipamento. O cálculo para a obtenção desta vazão volumétrica está descrito no APÊNDICE C, sendo que o valor encontrado foi de $1,17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Desta forma, optou-se por um filtro separador com vazão máxima de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, em aço carbono e aço inoxidável 304, cuja representação está na Figura 43, bem como suas características na Tabela 32.

Figura 43 – Filtro separador do biofertilizante sólido e líquido



Fonte: Dayong Vibration Equipment Co. (2022)

Tabela 32 – Dimensões do Filtro Separador

Voltagem	380 V
Potência	4 kW
Dimensões	2000x600x1300 mm
Peso	340 kg
Diâmetro interno do filtro	180 mm
Diâmetro de entrada	76 mm
Diâmetro do tubo de drenagem	110 mm

Fonte: Adaptado de Dayong Vibration Equipment Co. (2022)

9.4.4 Tanques de armazenamento

Após as operações unitárias de decantação e filtração, os biofertilizantes líquido e sólido necessitam ser armazenados para posteriormente serem vendidos. Para isto, inseriu-se no processo o tanque TA-401 para o armazenamento do biofertilizante líquido e o TA-402 para o sólido. De acordo com os cálculos apresentados no APÊNDICE C, necessita-se armazenar mensalmente 2.404,76 m³ de biofertilizante líquido e 695,5 toneladas de fertilizante sólido. Assim, optou-se para o líquido dois tanques horizontais, flexíveis, em poliéster, com resistência UV e de 1.500 m³, como apresentado na Figura 44.

Figura 44 – Tanque para armazenamento de biofertilizante líquido



Fonte: Labaronne-Citaf (2022)

Já para o biofertilizante sólido, pode-se armazenar em *big bags* de 2 ton, sendo que para a quantidade total produzida neste processo, serão necessários 348 *big bags* com esta capacidade. A Figura 45 a seguir demonstra a configuração destas sacarias de armazenamento.

Figura 45 – *Big Bag* para armazenamento de biofertilizante sólido



Fonte: Big Bag Aliance (2022)

10 UTILIDADES

A obtenção de utilidade quente é de suma importância para o desenvolvimento dos processos de troca térmica. A caldeira é o equipamento responsável pelo fornecimento de vapor, tendo uma ampla variedade de combustíveis para o fornecimento do calor necessário. O equipamento com esta necessidade é o TC-202, sendo que necessita de 16.597,20 kg/dia de vapor saturado a 110 °C. Transformando esta vazão mássica para kg/h para fins de dimensionamento, tem-se um valor de 691,55 kg/h. O balanço de massa deste equipamento não apresenta alteração da vazão de entrada de água, dado que toda esta corrente é vaporizada.

Para se obter o calor necessário para a vaporização da água, realizou-se o balanço energético apresentado no APÊNDICE B. O resultado deste balanço está expresso na Tabela 33.

Tabela 33 – Balanço de massa e energia da caldeira

Balanço de massa			Balanço de energia		
Correntes	Kg/h	Frações mássicas	T(°C)	P(bar)	Q(W)
Caldeira					
Líquido	691,55	$H_2O = 1$	20	1	529.052,0
Vapor superaquecido	691,55	$H_2O = 1$	130	1	

Fonte: Autoria própria (2022)

Como visto anteriormente, no Setor de Purificação do biogás tem-se a presença de diversos trocadores de calor. Para que a troca térmica ocorra, necessita-se de utilidades frias e quentes, sendo que para o TC-202, a utilidade escolhida foi vapor saturado. A obtenção desta utilidade quente se dá por meio de caldeiras, as quais podem ser movidas por diversos tipos de combustíveis, como biomassa, gás combustível ou eletricidade. No processo do presente trabalho, tem-se a necessidade de 691,55 kg.h⁻¹ de vapor saturado a 110°C. Para garantir a chegada deste vapor na temperatura desejada no trocador de calor, estipulou-se que o vapor gerado na caldeira sairá como vapor superaquecido, a 130°C.

Sendo assim, escolheu-se uma caldeira elétrica para o fornecimento do vapor, dado que a vazão de vapor necessária não é muito expressiva. Este equipamento realiza a vaporização da água por meio de resistências elétricas em aço inoxidável, com capacidade de produção de 1000 kg.h⁻¹ a até 8 kgf.cm⁻². A Figura 46 apresenta

a caldeira escolhida, a qual apresenta a necessidade de um sistema de tratamento para a adequação da água utilizada.

Figura 46 – Caldeira para geração de utilidade quente



Fonte: Ecal (2022)

11 **PROCESS FLOW DIAGRAM (PFD)**

O *process flow diagram* (PFD) é um esquema utilizado com a finalidade de representar fluxos de informações, em um processo produtivo, referentes aos equipamentos e conexões. O PFD foi elaborado para gerar uma maior compreensão dos processos produtivos envolvidos, sendo o diagrama é apresentado no APÊNDICE D.

12 LAYOUT DA INDÚSTRIA BIOG

O *layout* foi planejado com a finalidade de estruturar a empresa, respeitando o processo produtivo e visando aumentar a eficiência. Desta forma, por meio da disposição estratégica e localização dos setores é possibilitada uma maior qualidade e melhoria no fluxo de processo.

O *layout* está disponibilizado no APÊNICE E e abrange os quatro setores produtivos, sendo esses o recebimento da matéria-prima e produção do biogás no setor 100, purificação do biogás no setor 200, geração de energia elétrica no setor 300 e o tratamento do digestato no setor 400. Além dos setores, o *layout* possui o setor administrativo, refeitório e almoxarifado. Possui também um laboratório de qualidade, que está nos planos de ser implantado futuramente na indústria, para avaliar a qualidade dos produtos que serão entregues.

13 ANÁLISE FINANCEIRA

Com intuito de verificar a viabilidade econômica da BioG, realizou-se a análise financeira, sendo esta essencial para a tomada de decisões. Dessa forma, a análise financeira é projetada a fim de examinar as condições internas e externas, além dos dados financeiros de uma empresa (SCHROEDER et al., 2005).

Portanto, determina-se os custos fixos e variáveis, investimentos, cargas tributárias e fatores de risco, sendo eles necessários para iniciar um projeto, a fim de evidenciar a vulnerabilidade e rentabilidade da empresa.

13.1 Custos fixos

Os custos fixos são considerados custos que não variam de acordo com os níveis de produção em uma determinada instalação (SUNO, 2018).

Com isso, a BioG apresenta custos fixos com a compra de equipamentos que são utilizados nos processos produtivos, investimentos com o terreno e construção da usina, assim como a compra de veículos e EPIs. Além disso, há o custo mensal dos 100 colaboradores, respeitando todos os direitos trabalhistas. A Tabela 34 apresenta os valores anuais dos custos fixos, e são detalhados no APÊNDICE F.

Tabela 34 - Custos fixos anuais

Investimento anual	Valor
Equipamentos	R\$ 24.328.337,19
Folha salarial	R\$ 4.408.844,68
Terreno	R\$ 5.200.00,00
Construção	R\$ 3.300.000,00
Laboratório	R\$ 35.230,05
Projeto elétrico	R\$ 195.000,00
Sistema de incêndio	R\$ 14.000,00
Veículos	R\$ 2.343.996,00
Custo do escritório	R\$ 263.370,00
EPI	R\$ 38.848,32
Total	R\$ 40.137.626,24

Fonte: Autoria própria (2022)

13.2 Custos variáveis

Custos variáveis são custos que não são constantes, variam conforme a demanda de produção ou serviços, englobando custos com matéria prima e prestação de serviço temporária (NUBANK, 2022). A BioG não terá custos as matérias primas RSU e lodos, porém a empresa consome de 7358,37 MWh.mês⁻¹ de energia elétrica em que é descontado na sua produção de energia mensal. Assim, a Tabela 35 apresenta os investimentos variáveis da empresa.

Tabela 35 - Custos variáveis

Investimento anual	Valor
Água	R\$ 544.975,74
Custo variáveis dos veículos	R\$ 88.169,00
NaOH	R\$ 6.620.318,71
Selexol	R\$ 2.356.920,80
Total	R\$ 9.610.384,25

Fonte: Autoria própria (2022)

13.3 Capital de giro

O capital de giro inicial é uma parte essencial do financiamento de uma empresa, de modo que é projetado para garantir que a empresa continue operando financeiramente (NUBANK, 2022).

Com base nesses fatores, a determinação do capital de giro da BioG, consiste no funcionamento da empresa durante os 3 primeiros meses em função do custo de produção no primeiro ano, sendo ele de R\$12.437.002,62, conforme demonstrado no APÊNCIDE F – F2.

13.4 Financiamento

O conceito de financiamento pode ser descrito como uma forma de obter um investimento e efetuar pagamentos a médio e longo prazo, uma vez que os pagamentos são efetuados com taxas e juros adicionais. Com isso, como 25% do valor será concedido por meio de investimentos de sócios, então os 75% restantes são financiados por meio do programa do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDES), sendo ele de R\$46.638.759,84.

Por conseguinte, escolheu-se pelo Sistema de Amortização Constante (SAC) como tipo de financiamento, devido a sua vantagem econômica a longo prazo quando comparado com o sistema Price, com uma taxa de 12,649001% a.a. e prazo total de 20 anos, como apresentado na Tabela 36. O financiamento completo mensal é apresentado no APÊNDICE F, Tabela F3.

Tabela 36 - Financiamento anual

SAC (Sistema de amortização constante)				
Ano	Parcela	Juros	Amortização	Saldo Devedor
1	R\$ 7.786.646,72	R\$ 2.331.938,04	R\$ 5.454.708,68	R\$ 544.507.520,82
2	R\$ 7.507.514,50	R\$ 2.331.938,04	R\$ 5.175.576,46	R\$ 516.524.264,34
3	R\$ 7.228.382,28	R\$ 2.331.938,04	R\$ 4.896.444,24	R\$ 488.541.007,86
4	R\$ 6.949.250,06	R\$ 2.331.938,04	R\$ 4.617.312,02	R\$ 460.557.751,38
5	R\$ 6.670.117,84	R\$ 2.331.938,04	R\$ 4.338.179,80	R\$ 432.574.494,90
6	R\$ 6.390.985,63	R\$ 2.331.938,04	R\$ 4.059.047,59	R\$ 404.591.238,42
7	R\$ 6.111.853,41	R\$ 2.331.938,04	R\$ 3.779.915,37	R\$ 376.607.981,94
8	R\$ 5.832.721,18	R\$ 2.331.938,04	R\$ 3.500.783,14	R\$ 348.624.725,46
9	R\$ 5.553.588,96	R\$ 2.331.938,04	R\$ 3.221.650,92	R\$ 320.641.468,98
10	R\$ 5.274.456,74	R\$ 2.331.938,04	R\$ 2.942.518,70	R\$ 292.658.212,50
11	R\$ 4.995.324,52	R\$ 2.331.938,04	R\$ 2.663.386,48	R\$ 264.674.956,02
12	R\$ 4.716.192,31	R\$ 2.331.938,04	R\$ 2.384.254,27	R\$ 236.691.699,54
13	R\$ 4.437.060,09	R\$ 2.331.938,04	R\$ 2.105.122,05	R\$ 208.708.443,06
14	R\$ 4.157.927,86	R\$ 2.331.938,04	R\$ 1.825.989,82	R\$ 180.725.186,58
15	R\$ 3.878.795,64	R\$ 2.331.938,04	R\$ 1.546.857,60	R\$ 152.741.930,10
16	R\$ 3.599.663,42	R\$ 2.331.938,04	R\$ 1.267.725,38	R\$ 124.758.673,62
17	R\$ 3.320.531,20	R\$ 2.331.938,04	R\$ 988.593,16	R\$ 96.775.417,14
18	R\$ 3.041.398,99	R\$ 2.331.938,04	R\$ 709.460,95	R\$ 68.792.160,66
19	R\$ 2.762.266,77	R\$ 2.331.938,04	R\$ 430.328,73	R\$ 40.808.904,18
20	R\$ 2.483.134,55	R\$ 2.331.937,08	R\$ 151.196,51	R\$ 12.825.648,66
Total	R\$ 102.697.812,67	R\$ 46.638.759,84	R\$ 56.059.051,87	

Fonte: Autoria própria (2022)

Com o objetivo de encontrar o rendimento referente a receita líquida anual, foi necessário obedecer aos impostos sobre a receita bruta sendo eles: Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Programa de Integração Social (PIS), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ), Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) e Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (CIDE). Os valores de cada tributo encontram-se listados na Tabela 37.

Tabela 37 - Tributação e aplicação na Receita

Tributos	Taxa	Receita
ICMS - Energia	18%	Faturamento Mensal
ICMS - Fertilizante	18%	Faturamento Mensal
IRPJ	25%	Lucro Mensal
CIDE	10%	Lucro Mensal
PIS	9,25%	Faturamento Mensal
CSLL	9%	Lucro Mensal
COFINS	7,60%	Faturamento Mensal

Fonte: Autoria própria (2022)

13.5 Receitas

Para se custear os investimentos, verifica-se a receita em que se considera os recursos financeiros arrecadados. Dessa maneira, a renda gerada da BioG, se dará pela venda dos produtos e subprodutos oriundos do processo produtivo. Vale destacar que a empresa produz $34884 \text{ MWh.mês}^{-1}$, entretanto uma parte da produção será reaproveitada internamente, com isso os preços de cada tributo junto com a produção mensal comercializada de cada um deles encontra-se destacado na Tabela 38.

Tabela 38 – Renda mensal por tributo

Produto	Valor	Produção Mensal	Renda Mensal
Energia Elétrica	R\$ 322,17 /MWh	27525,624 MWh	R\$ 8.867.930,28
Biofertilizante Sólido	R\$ 600/ton	695,5 ton	R\$ 417.300,00
Biofertilizante Líquido	R\$ 350/ton	2786,5 ton	R\$ 1.161.041,67
Total			R\$ 10.446.271,95

Fonte: Autoria própria (2022)

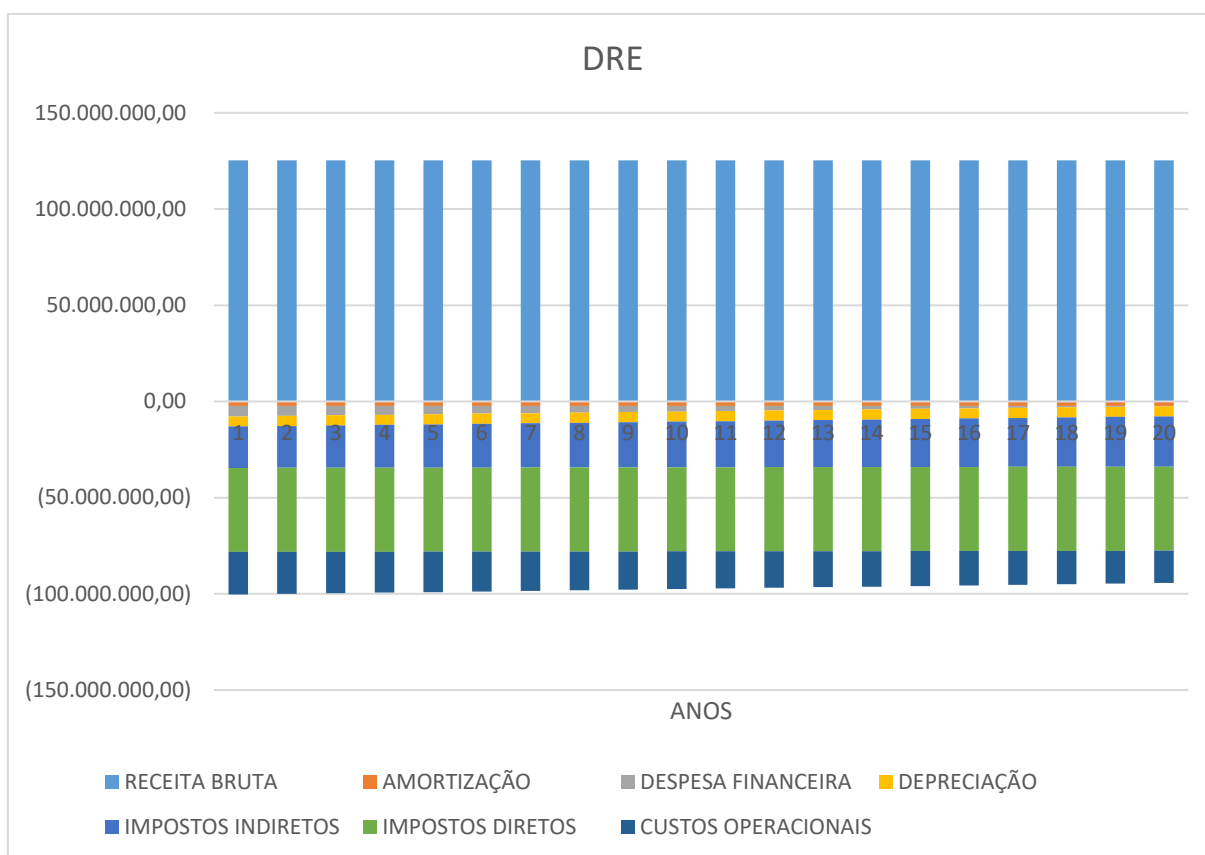
13.6 Demonstrativo de Resultado de Exercício (DRE)

O fluxo de caixa serve para orientar o administrador sobre a situação real da empresa, indicando sobra ou carências durante determinado período (MORAES, GOMES, 2013).

A BioG projetou o fluxo de caixa da empresa durante 20 anos, pois é o tempo do financiamento a ser pago com os dados obtidos através do DRE, o qual aborda demonstrativos de tendência, custos e despesas. Os valores estão expostos nas Tabelas F1, F2, F3, F4 E F5 do APÊNDICE F e na Figura 47.

É possível notar a partir da análise do DRE da empresa o bom desempenho produtivo desde o ano inicial. Também é possível perceber que a maior despesa se concentra no pagamento de impostos diretos, como ICMS, PIS e COFINS.

Figura 47 - DRE



Fonte: Autoria própria (2022)

13.7 Viabilidade financeira

Há várias maneiras de analisar se um negócio é viável financeiramente. Para isso é necessário o uso de algumas ferramentas. No caso da BioG, foram escolhidos para fazer essa análise a taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL) e *payback*.

13.7.1 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa que iguala os valores de entrada e saída no fluxo de caixa. Pode-se dizer também que ao aplicar o valor da TIR no VPL, este último torna-se igual a zero, ou seja, o investimento ficaria neutro. Assim, a TIR deve ser positiva e quanto maior o seu valor mais promissor é o investimento. Dessa forma, o TIR obtido para a BioG foi de 41%.

Porém, para comparar se a TIR é um valor razoável, é preciso compará-la com a taxa mínima de atratividade (TMA), que é a taxa mínima para o negócio ser viabilizado. A TMA leva em conta a taxa SELIC que no ano atual (2022) se encontra em 12,5%, taxa de risco e a liquidez. A TMA adotada pela BioG foi de 19%, 12,5% referente a SELIC, 3,5% referente a taxa de risco adotada e 3% a taxa de liquidez e, portanto, menor do que a TIR (WR PRATES, 2017).

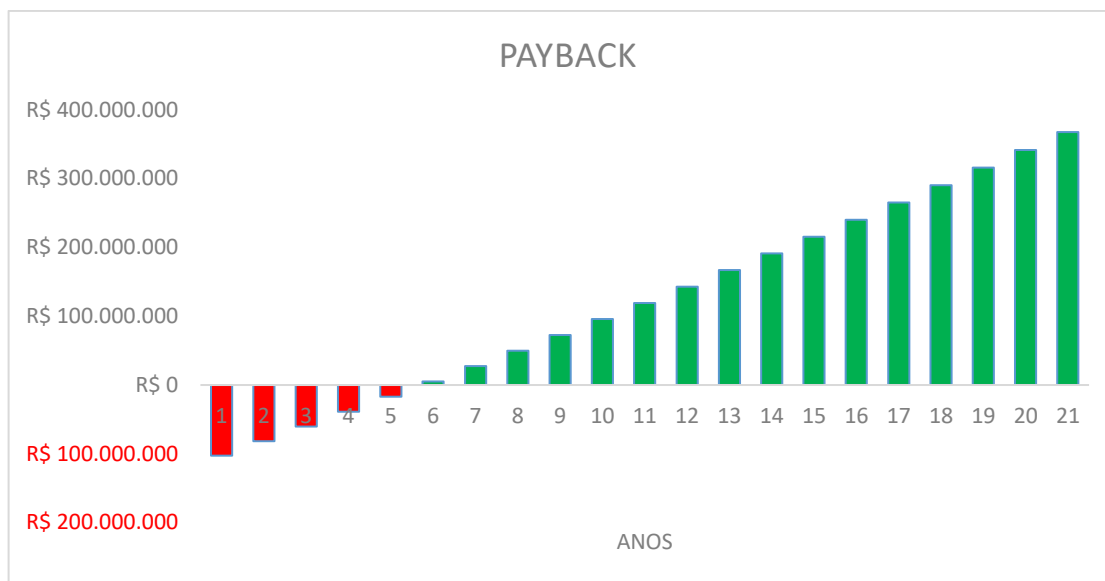
13.7.2 Valor Presente Líquido e *Payback*

A definição do Valor Presente Líquido (VPL) é a de uma soma algébrica de fluxos de caixa descontados para o instante presente, a uma determinada taxa de juros (SVIECH, 2013). O cálculo representa a diferença entre o que será recebido no futuro perante o investimento inicial.

O *Payback* possibilita saber em quanto tempo o investimento inicial será pago, fazendo os descontos do valor presente líquido ano a ano e analisar quando o financiamento será quitado.

Portanto, o *Payback* da BioG é apresentado por meio da Figura 48, a qual mostra que o retorno está previsto para o sétimo ano, configurando um retorno de médio a longo prazo, coerente para empresas desse porte produtivo e com o investimento inicial necessário.

Figura 48 - Payback



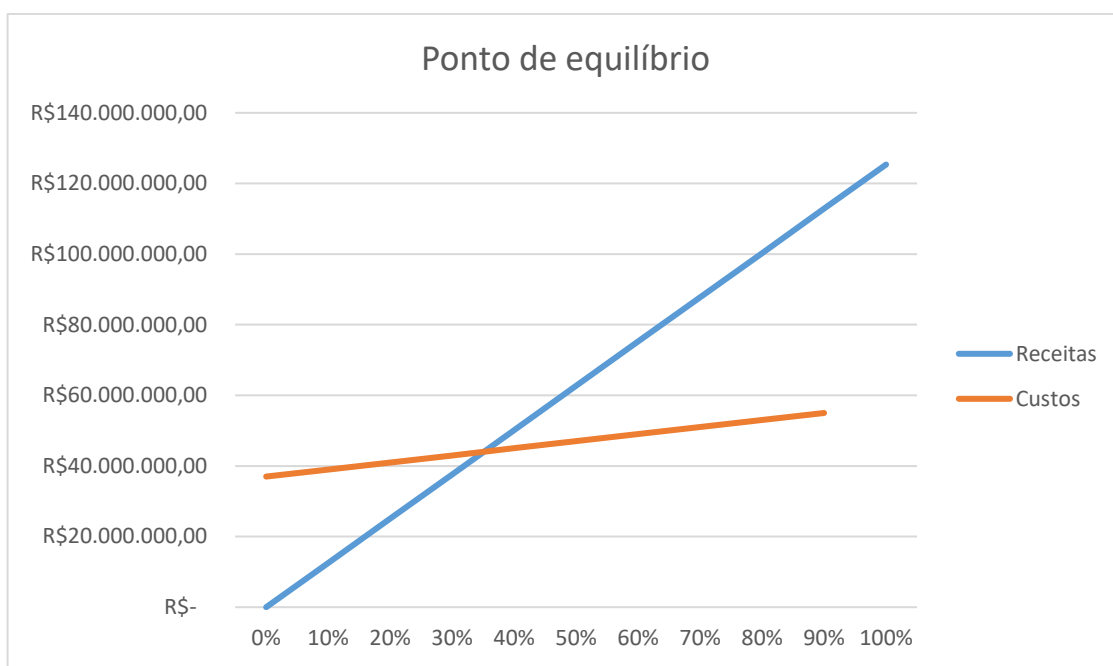
Fonte: Autoria própria (2022)

13.7.3 Ponto de equilíbrio

O ponto de equilíbrio mostra o momento em que o percentual produtivo da empresa supera os gastos médios, sendo esse o momento em que a empresa passe a obter lucro.

No caso da BioG, a produção mínima necessária é de 40% para que a empresa tenha lucro suficiente para cobrir os gastos sem que gere prejuízo. O cálculo é apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Ponto de equilíbrio



Fonte: Autoria própria (2022)

14 CONCLUSÃO

Tendo em vista a crescente necessidade de matrizes energéticas renováveis e limpas, para a produção de energia elétrica em âmbito nacional, deu-se início o processo de desenvolvimento da Usina de Biogás BioG. Para a solidez do projeto, levantou-se dados para a análise do biogás no mercado nacional e internacional, além do estudo da localização física deste polo de geração de energia elétrica.

Por meio da digestão anaeróbica de 1000 toneladas mensais de RSU, que ocorrerá pelos microrganismos presentes nos lodos 1º e 2º da ETE, a produção de biogás será de 512,80 ton.mês⁻¹. Após passar pelo processo de purificação, 217,88 toneladas mensais de biogás purificado serão utilizadas como combustível de turbinas geradoras, visando a geração de 85.000 kW.mês⁻¹. Além do biogás, o processo oferecerá como subproduto 3.566,7 toneladas mensais de biofertilizante, o qual possui elevado aproveitamento econômico. Com a finalidade de honrar com seu compromisso com o meio ambiente, a usina será responsável pelo tratamento das correntes gasosas emitidas à atmosfera.

A demanda energética na região metropolitana da cidade totalizou 3.217.952.826 kW no ano de 2016, consumo este devido à elevada atividade industrial na região. Sendo assim, a empresa abordada neste trabalho solucionará diversas problemáticas de demanda energética, produção de energia limpa, aproveitamento de RSU e lodo das ETEs.

Para isso, foram feitos os cálculos referentes ao balanço de massa e energia, bem como a integração energética e dimensionamento dos equipamentos que serão utilizados durante o processo. Este projeto também contemplou o orçamento para a compra dos mesmos, assim como a apresentação do *layout* e o fluxograma de processos (PFD).

A análise financeira constatou um financiamento de R\$47.290.822,67, tal recurso será utilizado para a compra do terreno, equipamentos, construção e matérias-primas para início da produção e será pago durante 20 anos. O *payback* calculado foi de 6 anos, tempo necessário para o retorno do investimento inicial.

Sendo assim, por meio das análises de viabilidade financeira e os demais cálculos de produtividade apresentados no decorrer do trabalho, pode-se concluir que a BioG é uma empresa promissora, com uma TIR de 41%.

REFERÊNCIAS

- ADNAN, A. I. A. ONG, M. Y. NOMANBHAY, S. CHEW, K. W. SHOW, P. L. Technologies for biogas upgrading to biomethane: A Review. **Bioengineering**, n. 6, v. 92, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5354/6/4/92>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- AERZEN. **Biogas Solutions: Compressors for biogas e biomethane**, 2022. Disponível em: https://www.aerzen.com/fileadmin/user_upload/02_documents/02-02_applications/02-02-07_biogas-biomethane/B1-001-03-EN_Headquarter.pdf. Acesso em 27 out. 2022.
- ALVAREZ, J. M. CANETA, L. MOYANO, C. **Biomassa y Biogas**. Universidad Nacional del Nordeste, 2000.
- ANDERSON, T. R. HAWKINS, E. JONES, P. D. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. **Endeavour**, v. 6, n. 3, p. 178-187, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0160932716300308?via%3Dihub>. Acesso em: 05 mai. 2022.
- ANDRIANI, D., WRESTA, A., ATMAJA, T., D. et al. **A review on optimization production and upgrading biogas through co2 removal using various techniques**. Appl Biochem Biotechnol 172, p. 1909-1928, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0652-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12010-013-0652-x>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- ANGELIDAKI, I. et al, Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water science and Technology**, [S.l.], v. 59, n.5, p. 927-934, 2009. DOI: 10.2166/wst.2009.040. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/59/5/927/15563/Defining-the-biomethane-potential-BMP-of-solid>. Acesso em: 26 abr. 2022.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 685, 29 de junho de 2017**. Estabelece as regras para a aprovação do controle de qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo território nacional. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-685-2017-estabelece-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-e-a-especificacao-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-industriais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao&q=685>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- ANUKAM, A. MOHAMMADI, A. MUHAMMAD, N. GRANSTRÖM, K. A review of the chemistry of anaerobic digestion: Methods of accelerating and optimizing process

Efficiency. **Process**, v. 7, n. 504, 2019. DOI: 10.3390/pr7080504. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/8/504>. Acesso em: 10 jun. 2022.

AQUALIMPIA. **Biodigestores industriales**: Digestores, 2017. Disponível em: <https://www.aqualimpia.com/>. Acesso em 27 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004/04**: informação e documentação: resíduos sólidos – Classificação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <https://webapp.utfpr.edu.br/bibservices/gedWeb>. Acesso em: 15 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13221**: informação e documentação: transporte terrestre de produtos perigosos – Resíduos. 6. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. Disponível em: <https://webapp.utfpr.edu.br/bibservices/gedWeb>. Acesso em: 15 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7229**: Projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementares e disposição final dos efluentes de tanques sépticos: procedimentos. Rio de Janeiro, 1993. 15p.

BIG BAG ALIANCE. **Como escolher o tamanho de um Big Bag**. Disponível em: https://www.bigbagalliance.com/amp/como-escolher-o-tamanho-de-um-big-bag?gclid=CjwKCAjw8JKbBhBYEiwAs3sxN2Fa7pfhaFzK6kut4WzX9KTE4FXygSN9qcfnoY8CgfJ76Lt-Eh_HcxoC97QQAvD_BwE. Acesso em 04 nov. 2022.

BOTKIN, D. B.; KELLER, E. A. **Ciência ambiental** - Terra, um planeta vivo, 7 ed., Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2009. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2277-2/>. Acesso em: 31 mar. 2022.

BRAGA, B. et al. **Introdução a Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Pratiche Hall, 2 ed., 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 375, 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de logos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em: <https://webapp.utfpr.edu.br/bibservices/gedWeb>. Acesso em 18 abr. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 430, 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: <https://webapp.utfpr.edu.br/bibservices/gedWeb>. Acesso em 06 mai. 2022.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Biometano como combustível veicular**. Brasília: PROBIOGÁS, 2016. Disponível em: https://www.giz.de/en/downloads/giz_biogas_como_combustivel_digital_simples.pdf. Acesso em: 25 abr. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Operação e manutenção de tanques sépticos-lodo**: manual de boas práticas e disposição do

lodo acumulado em plantados com macrófitas e desinfecção por processo térmico. Brasília: Funasa, 2014. 32 p. Disponível em: https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/operacao_manutencao_tanques_septicoss_lodo_manual_praticas.pdf. Acesso em 26 abr. 2022.

BRUNO, J. C. LÓPEZ, V. O. CORONAS, A. Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant. **Applied Energy**, v. 86, n. 6, p. 837-847, jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.08.007>. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0306261908001980>. Acesso em: 1 abr. 2022.

CAMPINAS, Prefeitura Municipal de. **Novos modelos de gestão de resíduos sólidos**, 2018. Disponível em: <https://www.eventoanap.org.br/data/inscricoes/5311/form2222191317.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2022.

CAMPINAS, Prefeitura Municipal de. **Nova lei de incentivos fiscais é aprovada pela câmara municipal**, 2021. Disponível em: <https://portal.campinas.sp.gov.br/noticia/42624>. Acesso: 02 de abril de 2022.

CAMPOS, J. R., “**Notas da aula de Tratamento de Águas Residuárias**”, Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento na Escola de Engenharia de São Paulo. 1998.

CHANG, Chia-Chi et al. A case study on the electricity generation using a micro gas turbine fuelled by biogas from a sewage treatment plant. **Energies**, [S.l.], v. 12, p. 1-15, 24 jun. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/12/2424>. Acesso em: 10 jun. 2022.

CEMLINE. **Flash Tanks (FST)**, 2022. Disponível em: <https://sizing.cemline.com//Products/fst/fstsizing.asp?p=1>. Acesso em: 01 nov. 2022.

CIBILOGÁS: Energias renováveis. **Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro**. 2012. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/>. Acesso em: 03 de abril de 2022.

COLTURATO, L. F. D. B. **Dessulfurização de biogás da metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H₂S**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AAXES8>. Acesso em: 06 mai. 2022.

COLTURATO L. F.D. B. et al. **Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de RSU com produção de biogás**. Brasília: PROBIOGAS, 2016. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/Viabilidade_RSU.pdf. Acesso em 19 abr. 2022.

COLTURATO, L. F. D. B. FARIA, J. P. O. MOTTA, V. S. SANTOS, L. L. CHERNICHARO, C. A. L. Avaliação de lavador de gases do tipo Venturi, operando

com solução de hidróxido de sódio, para a dessulfuração de biogás com altas concentrações de H₂S. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 65-76, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41520201600100131751. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/tKpx3gGPHDC7jMV9sKRtQyw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 06 mai. 2022.

CONVERTI, A. ZILLI, M. **A biofiltração: Uma tecnologia já afirmada no tratamento de efluentes gasosos**, 1999. Disponível em: dichep.unige.it/old_site/Italiano/ricerca/pub_biotec_av/1999/1999_18.pdf. Acesso em: 15 abr. 2022.

CORNNOR, N. O que é ciclo de Brayton – Definição. **Thermal Engineering**. 2020. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-ciclo-de-brayton-motor-de-turbina-a-gas-definicao/>. Acesso em: 24 out. 2022.

COSTA, V. L. MARIA, I. C. CAMARGO, O. A. GREGO, C. R. MELHO, L. C. A. Distribuição espacial de fósforo em latossolo tatado com lodo de esgoto e adubação mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 3, p. 287-293, 2014.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**, 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabStulio.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2022.

CHEN, C. **A technical and economic assessment of selexol-based CO₂ capture technology for IGCC power plants**, 2003. DOI: 198903593. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Technical-and-Economic-Assessment-of-CO-2-Capture-Chen-Rubin/663fe460eb9d1b303a61a2f27b7cf09c9ab1bb96#paper-header>. Acesso em: 20 out. 2020.

SILVA, C. et al. **Geração de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos: Um comparativo entre potencial e demanda nacional**. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2021/IV-016.pdf>. Acesso em 18 abr. 2022.

DAYONG. **Dayong Vibration Equipment Co. Ltd**. Disponível em: <https://vibratingscreener.en.made-in-china.com/product/FdyaYomPEqUb/China-Inclined-Sieve-Solid-Liquid-Separator-Tower-Dewatering-Drying-Machine-Filter-Engine-for-Bio-Gas-Caw-Horse-Pig-Manure-Sludge.html>. Acesso em 03. nov. 2022.

DEMAKINE. **Esteira transportadora para reciclagem – triagem**, 2022. Disponível em: <https://www.demakine.com.br/produto/esteira-transportadora-para-reciclagem-triagem/>. Acesso em 28 out. 2022.

DE MIRANDA, R. L.; MARTINS, E. M.; LOPES, K. **A potencialidade energética da biomassa no Brasil**. Desenvolvimento Socioeconômico em Debate, v. 5, n. 1, p. 94-106, 2019.

DEUBLEIN, D. STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources. **Deggendorf and Domdidier**. Wiew-VCH, 2011.

DEWIL, R. APPELS, L. BAEYENS, J. Energy use of biogas hampered by presence of siloxanes. **Energy conversion & Management**, n. 47, p. 1711-1722, 2006. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.10.016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222550039_Energy_use_of_biogas_hampered_by_the_presence_of_siloxanes_Energy_Convers_Manag_4713-141711-1722. Acesso em: 05 mai. 2022.

ECAL. **Caldeiras e Aquecedores**. Disponível em: <https://www.ecal.com.br/produtos/caldeira-geradora-de-vapor-horizontal-elitrica>. Acesso em: 01 nov. 2022.

ESSEL. **Trocadores de calor**: Projeto térmico de trocadores de calor. 2020. Curso profissionalizante. Disponível em: <https://essel.com.br/cursos/material/03/CAP3.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2022.

EXAUSFIBRA. **Coletor de pó**. Disponível em: <https://www.exausfibra.com.br/info-filtro-m%C3%B3vel>. Acesso em 27 out. 2022.

FACHVERBAND BIOGAS. Biogas Safety First! Diretrizes para o uso seguro da tecnologia de biogás. **Fachverd Biogas – Associação Alemã de Biogás & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)**, 2017. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/Broschre-SICHERHEIT-PORTUGIESISCH-2016-100dpi_final.pdf. Acesso em: 03 mai. 2022.

FLOCK, L. TAVARES, M. H. F. EYNG, E. ORSATTO, F. Produção de biogás como fonte alternativa de energia: uma revisão. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, Medianeira, v. 9, n. 24, p. 1-15, 2018. DOI: 103895/recit. V9n24.5996. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/recit/article/viewFile/5996/pdf>. Acesso em: 02 mai. 2022.

FOGAÇA, J. R. V. **Entalpia de combustão**. 2018. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/entalpia-combustao.htm>. Acesso em 17 de nov de 2022.

FOSSIL FUELS. **World in data**, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>. Acesso em: 31 mar. 2022.

FRANÇA J. A. T. de. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto**. 151p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88894/francajunior_at_me_ilha.pdf?sequence=1. Acesso em 8 maio de 2022.

FUSATI, **Filtro de água industrial**, 2022. Disponível em: <https://www.fusati.com.br/filtro-de-agua-industrial/>. Acesso em 31 out. 2022.

FREITAS, F. F. et al. **The brazilian market of distributed biogas generation: overview, technological development and case study**. Renewable and Sustainable

ENERGY REVIEWS, vol. 101, mar. de 2019, p. 146–57. ScienceDirect, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and unit operations**. 3 ed. New Jersey: Englewood Cliff, 1993. 935 p.

GOMES, F. C. S. P. **Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias**. 199 p. Tese (Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação e Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/9907>. Acesso em 02 maio de 2022.

GOMES, F. et al. **Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás**. Brasília: PROBIOGAS, 2016. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/licenciamento-usinas-biogas.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2022.

GOMES, Maria José Oliveira; MORAES, Luciana Silva. A Importância do fluxo de caixa para a organização financeira da Empresa X. *Revista Científica Semana Acadêmica*. Fortaleza, ano MMXI, n. 000006, 2013.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, n.17, ed. 6, p. 1503-1509, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000600014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/y5kTpqkqyY9Dq8VhGs7NWwG/abstract/?lang=pt>. Acesso em 27 mai. 2022.

GUERREIRO, E. M. da S. et al. **Potencial de aproveitamento energético de biometano gerado em aterros sanitários: estudo de casos**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/16878>. Acesso em 29 abr. 2022.

GUIMARÃES, C. M. M.; GALVÃO, V. **Produção e uso do biogás**. In: 8 Congresso Internacional de Bioenergia São Paulo–SP–05 a. 2013.

GUPTA, K. K. et al. **Bio-fuels for the gas turbine: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.14, p.2946-2955, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110002054>. Acesso em: 06 mai. 2022.

HARTMANN H., ANGELIDAKI I., AHRING B. K. **Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration**. *Water Sci Technol*. 2000;41(3):145-53. PMID: 11381985. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11381985/>. Acesso em: 19 de abr. 2022.

HIMMELBLAU, D. M. RIGGS, J. B. **Engenharia Química - Princípios e Cálculos**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2711-1/>. Acesso em: 09 jun. 2022.

HORIKAWA, M. S. ROSSI, F. GIMENES, M. L COSTA, C. M. M. SILVA, M. G. C. Chemical absorption of H₂S for biogas purification. **Brazilian Journal of Chemical ENGINEERING**, v. 21, p. 415-422, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322004000300006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjce/a/qSGS4pnwV5SP8GjcWnBRdPH/?lang=en>. Acesso em: 06 mai. 2022.

HOYER, K. et al. Biogas upgrading – technical review. Estocolmo: **Energiforsk**, 2016. Disponível em: <https://portal.research.lu.se/en/publications/biogas-upgrading-technical-review>. Acesso em: 24. out. 2022.

IBGE, População de Campinas, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/campinas/panorama>. Acesso em 02 abr. 2022.

IMASHOP. Ímãs de neodímio. 2021. Disponível em: <https://www.imashop.com.br/imas-de-neodimio?uam=true&mobile=4>. Acesso em 02 nov. 2022.

KARLSSON, T. et al. **Manual básico de biogás**. Lajeado: ED. Da Univates, 2014. 69 p. Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf. Acesso em 02 maio 2022.

KHANAL, S. K. Microbiology and biochemistry of anaerobic biotechnology. In: KHANAL, Samir Kumar (org.). **Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications**. Ames: John Wiley & Sons, 2008. P 29 - 41. DOI: <https://doi.org/10.1038/209456a0>.

KOUGIAS, P. G.; ANGELIDAKI, I. “**Biogas and Its Opportunities—A Review**”. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, vol. 12, no 3, abril de 2018, p. 14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>.

LABARONNE-CITAF. **Tanque para fertilizante líquido**. Disponível em: <https://www.agriexpo.online/pt/prod/labaronne-citaf/product-169543-148549.html>. Acesso em: 04. nov. 2022.

LEE, E. S. H. Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético. II CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2011, Londrina. **Actas do [...]**. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/X-001.pdf>.

LEHMANN, R. G. MILLER, J. R. XU, D. SINGH, U. B. REECE, C. F. Degradation of silicone polymer at different soil moistures. **Environmental Science and Technology**, n. 32, p. 1260-1264, 1998. DOI: 10.1021/es970918z. Disponível em: <https://eurekamag.com/research/003/086/003086805.php>. Acesso em: 05 mai. 2022.

LEWA. **Creating fluid solutions**, 2022. <https://www.lewa.com.br/pt/bombas/bombas-de-deslocamento-rotativo/bomba-rotativa-de-lobulo-pomac>. Disponível em: Acesso em: 01 nov. 2022.

LINS, L. P. MITO, J. Y. L. FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. IV SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS, 2015, Rio de Janeiro. **Actas do [...]**. Disponível em: http://www.sbera.org.br/4sigera/files/4.28_JessicaYukiLimaMito.pdf. Acesso em 15 abr. 2022.

LIPPEL. Peneira rotativa trommel LIPPEL PRTL 1000 x 3000. 2022. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/peneiras-rotativas/peneira-rotativa-trommel-lippel-prtl-1000-x-3000/>. Acesso em 28 out. 2022.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ENGD-8KYNF3/1/tese_n_57___l_via_lobato.pdf. Acesso em 06 maio 2022.

LÖTTERS, J. C. OLTHUIS, W. VELTINK, P. H. BERVELD, P. The mechanical properties of the rubber elastic Polymer polydimethylsiloxane for sensor applications. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 7, n. 3, p. 145-147, 1997. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/7/3/017>. Acesso em: 05 mai. 2022.

LUZ, G. **Densidade do Fósforo (P) + Cor, Usos, Descoberta**: Materiais por Gelson Luz, [s. l], 2019. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2019/09/densidade-do-fosforo-p-cor-usos.html>. Acesso em: 02 nov. 2022.

LUZ, G. **Densidade do Potássio (K) + Cor, Usos, Descoberta**: Materiais por Gelson Luz, [s. l], 2019. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2019/09/densidade-do-potassio-k-cor-usos.html>. Acesso em: 02 nov. 2022.

LUZ, G. **Calor específico do ar**. [s. l], 2022. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2019/09/densidade-do-potassio-k-cor-usos.html>. Acesso em: 02 nov. 2022.

MACKIE, R. I; BRYANT, M. P. Metabolic activity of fatty acid-oxidizing bacteria and the contribution of acetate, propionate, butyrate and CO₂ to methanogenesis in cattle waste at 40 and 60°C. **Applied and Environmental Microbiology**, [S.l.], v. 41, n.6, p. 1363-1373, 1981. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC243924/pdf/aem00199-0085.pdf>. Acesso em 02 maio 2022.

MAGALHÃES, E. A. et al. Confecção e avaliação de um sistema de remoção de CO₂ no biogás. **Acta Scientiarum. Technology**. Maringá, v. 26, n, 1, p. 11-19, 2004.

MAGFINE SRL. **Placas magnéticas quadradas da série MP**. 2016. Disponível em: https://www.magfine.it/pt/user_data/magnet_plate.php. Acesso em 02 nov. 2022.

MARCUCCI, L. W. **Otimização da produção de biogás em biodigestores batelada**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Biociências de Botucatu, Botucatu, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153157/marcucci_lw_me_bot.pdf?sequence=3. Acesso em 04 maio 2022.

MATOS, C. F. et al. **Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção**. 2016. 52 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Instituto de

MATOS, S. P. D. **Operações Unitárias - Fundamentos, Transformações e Aplicações dos Fenômenos Físicos e Químicos**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520018/>. Acesso em: 27 out. 2022.

MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA: TUDO O QUE VOCÊ PRECISA SABER; **CPFL Soluções**, 2021. Disponível em: <https://cpflsolucoes.com.br/mercado-de-energia-eletrica-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em : 05 jul. 2022.

METCALF, B. EDDY, I. N. C. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 3. ed, p. 765-926, Nova York: McGraw-Hill. E.U.A., 1991.

MICHAELIS. Dicionário Brasileiro de Língua Portuguesa. São Paulo: Melhoramentos, 2022. E-book. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/busca?id=8BIA>. Acesso em: 31 mar. 2022.

MILANEZ, A. Y. et al. **Biogás**: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. [177] -213, mar. 2021. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20801#:~:text=Biblioteca%20Digital%20do%20BNDES%3A%20Biog%C3%A1s,energia%20renov%C3%A1vel%20para%20o%20Brasil&text=Resumo%3A,em%20sua%20implementa%C3%A7%C3%A3o%20no%20Brasil>. Acesso em 29 abr. 2022.

MORAN, M. J. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 8 ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634904/>. Acesso em: 25 out. 2022.

MORE THAN 80% OF OUR ENERGY STILL COMES FROM FOSSIL FUELS. **World in data**, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-overview>. Acesso em: 31 mar. 2022.

MOREIRA, J. R. S. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2021. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636816/>. Acesso em: 31 mar. 2022.

MOREIRA, J. R. S. **Turbina a gás**. Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo. São Paulo, 2002. Disponível em: <http://paineira.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2018/09/turbinasgas.pdf>, Acesso em: 06 maio 2022.

MORETTO, S.R.O.; PUPPI, R.F.K.; PEGORINI, E.S.; INOUE, P.S.; OLIVEIRA, G.G. de **Medidas da densidade do lodo proveniente de digestão anaeróbia**. 2011.

Artigo em Hypertexto. Disponível em:

http://www.infobibos.com/Artigos/2011_1/DensidadeLodo/index.htm. Acesso em: 28 out. 2022.

MUVHIIWA, R. F. **A thermodynamic approach to biogas production**. 2015.

Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade da África do Sul, 2015. DOI:

<http://hdl.handle.net/10500/19037>. Disponível em:

<https://uir.unisa.ac.za/handle/10500/19037>. Acesso em 24. out. 2022.

NASCIMENTO, M. C. B., et al. **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, vol. 24, abril de 2019, p. 143–55.

SciELO, <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019171125>.

NATREB. **Moinho de rolos lisos MN-500 C**. 2022. Disponível em:

<https://natreb.com/produtos/moinho-de-rolos-lisos-mn-500/>. Acesso em 02 nov. 2022.

NAZARO, M.S. **Desenvolvimento de um biodigestor residencial para**

processamento de resíduos sólidos orgânicos. 2016. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2016. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/166781/TCC%20-%20Mariane%20Scheffer%20Nazaro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 22 abr. 2022.

NETO, M. R. B.; CARVALHO, P. C. M. D. **Geração de energia elétrica -**

fundamentos. São Paulo: Editora Saraiva, 2012. E-book. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518572/>. Acesso em: 31 mar. 2022.

NITROTEC. **Densidade do nitrogênio líquido na condição saturada**. 2021.

Disponível em: <https://nitrotec.com.br/global/wp-content/uploads/2021/08/Tabela-de-densidade-do-Nitrogenio-Liquido-na-condicao-saturada.pdf>. Acesso em 02 nov. 2022.

NUBANK. **O que é capital de giro?**, 2021. Disponível em:

<https://blog.nubank.com.br/o-que-e-capital-de-giro/>. Acesso em: 05 out. 2022.

NUVOLARI, A. TELLES, D. D. RIBEIRO, J. T. MIYASHITA, N. J. RODRIGUES, R. B.

ARAÚJO, R. **Esgoto Sanitário. Coleta, transporte e reuso agrícola**. Edgard

Blucher LTDA, 1 ed., São Paulo, 2003.

OFICINA BRASIL. **SCR Catalisador seletivo redutor realiza a neutralização das emissões de óxido de nitrogênio**. 2018. Disponível em:

<http://www.sindicatodaindustria.com.br/noticias/2018/01/72,120257/scr-catalisador-seletivo-redutor-realiza-a-neutralizacao-das-emissoes-de-oxido-de-nitrogenio.html>.

Acesso em 06 maio de 2022.

OKOROIGWE, E. C.; MADHLOPA, A. **Evaluation of the potential for hybridization of gas turbine power plants with renewable energy in South Africa**. Proceedings of the 23rd Conference on the Domestic Use of Energy, DUE 2015. Energy Research Centre, University of Cape Town, Rondebosch, South Africa, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274379635_Evaluation_of_the_Potential_for_Hybridization_of_Gas_Turbine_Power_Plants_with_Renewable_Energy_in_South_Africa. Acesso em 06 maio de 2022.

PANWAR, N. L. KADAM, R. K. Recent advancement in biogás enrichment and its applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 73, p. 892-903, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.167>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211730182X?via%3Di> hub. Acesso em: 31 mar. 2022.

PERSSON, M. JONSSON, O. WELLINGER, A. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid. **IEA Bioenergy**, p. 1-32, 2017. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/biogas-upgrading-to-vehicle-fuel-standards-and-grid-injection/>. Acesso em: 02 mai. 2022.

PINIWEB. **Campinas ganhará primeira usina de geração de energia a partir do lixo reciclado**, 2022. Disponível em: <https://piniweb.com.br/campinas-ganhara-primeira-usina-de-geracao-de-energia-a-partir-do-lixo-reciclado/>. Acesso: 02 de abril de 2022.

PLOOMES. **O que são vendas b2b e como ter sucesso nesse processo de vendas**, 2020. Disponível em < <https://blog.ploomes.com/o-que-sao-vendas-b2b/> > Acesso: 03 de abril de 2022.

PLUGGE, C. M. Biogas. **Microbial Biotechnology**, 10, p. 1128-1130, 2017. DOI: <https://doi-org.ez48.periodicos.capes.gov.br/10.1111/1751-7915.12854>. Disponível em: <https://sfamjournals-onlinelibrary-wiley.ez48.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1111/1751-7915.12854>. Acesso em: 31 mar. 2022.

POSTEL, J. et al., Tecnologia de Usinas para a Produção de Biogás. In: PROBIOGÁS. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Gülzow: Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ), 2010. P.31-72. Disponível em: http://www.resol.com.br/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf. Acesso em 16 abr. 2022.

QUEIROZ, M.; MATIAS, J. A. Básico de turbinas a gás. PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **PETROBRAS**. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: https://www.academia.edu/25808837/Basico_de_Turbinas_a_Gas_Petrobras. Acesso em: 24 out. 2022.

RABINDRAN, A. V. R. **Sreening of Solvents for CO₂ Capture: Kinetcs, Solubility and Calorimetric Studies**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Industriais) – Universidade de Regina, Regina, 2012. Disponível em: https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=NR88581&op=pdf&app=Library&oclc_number=1007731198. Acesso em: 31 out. 2022.

RAHMANI, A. M. TYAGI, V. K. AHMED, B. KAZMI, A. A. CHEKAR, C. OJHA, P. SINGH, R. Critical insights into anaerobic co-digestion of wheat straw with food waste and cattle manure: Synergistic effects on biogas yield and kinetic modeling. **Environmental Research**, v. 212, part C, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113382>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935122007095>. Acesso em: 10 jun. 2022.

RUSSELL. **Industrial liquid solid separation equipment continuously removes solids from liquid slurries**. 2022. Disponível em: <https://www.russellfinex.in/products/liquid-solid-separator/#:~:text=The%20Russell%20Liquid%20Solid%20Separator, costs%20and%20reducing%20product%20wastage>. Acesso em 02 nov. 2022.

RYCKEBOCH, E. DROUILLON, M. VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass & Bioenergy**, n. 35, p. 1633-1645, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0961953411001085?via%3Dihub>. Acesso em: 24 abr. 2022.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.33, p.1102-1107, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195340900052X>. Acesso em 06 maio 2022.

SCHROEDER, J. T. et al. O custo de capital como taxa mínima de atratividade na avaliação de projetos de investimento. **Revista Gestão Industrial**, v. 1, n. 2, 2005.

SCHULTE, B. **Experiences with the operation of different digester in Germany**. 1º Congresso Técnico Brasil Alemanha – Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos. Apresentação. Jundiaí, 16 e 17 dez. de 2013. Disponível em: <http://congressobrasilalemanha.jundiai.sp.gov.br/download/>. Acesso em: 03 mai. 2022.

SEBRAE. **Cobertura para Biodigestores e Gasômetros de Dupla Membrana X Simples Membrana**, 2018. Disponível em: <https://sebraepr.com.br/comunidade/artigo/cobertura-para-biodigestores-e-gasometros-de-dupla-membrana-x-simples-membrana>. Acesso em 02 nov. 2022.

SIEFERT, N. Hydrophobic, physical solvents for pre-combustion CO₂ capture: Experiments and System Analysis. **National Energy Technology Laboratory**, 2015. Disponível em: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2015/co2captureproceedings/N-Siefert-NETL-Hydrophobic-Solvents.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2022.

SIEMENS ENERGY. **Reliable, robust, and flexible power Generation**. 2022. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt6-2000e.html>. Acesso em 02 nov. 2022.

SIEMENS ENERGY. **Proven two-pole air-cooled generator for industrial and large power applications**. 2022. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/generators/s-gen-100a.html>. Acesso em 02 nov. 2022.

SILVA, A. C. G.; TREVISAN, G. de M. **Processo de produção e aproveitamento energético do biogás: uma revisão dos sistemas e tecnologias existentes no mercado**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, vol. 10, no 2, 2, junho de 2019, p. 197–210. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.002.0017>. Disponível em: www.sustenere.com.

SILVA, M. C.; SANTOS, G. O. **Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados**. 2010. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Disponível em: <http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/167/157>. Acesso em 28 out. 2022.

SILVA, S. V. D. Princípio de Balanços Termo energéticos em Caldeiras Geradoras de Vapor nas Indústrias Sucroalcooleiras. CEPI, 2011.

SILVERIO, A., **A importância do polo industrial de campinas para o brasil**. Indústrias Hoje, 2021. Disponível em < <https://industria hoje.com.br/a-importancia-do-polo-industrial-de-campinas-para-o-brasil> > Acesso: 03 de abril de 2022.

SOARES, F. R. **Aproveitamento energético dos resíduos orgânicos**, 2021. Disponível em: <https://energiaebiogas.com.br/aproveitamento-energetico-dos-residuos-organicos>. Acesso em 17 abr. 2022.

STAFF, R. **Fact box: Pandemic brings forward predictions dor peak oil demand**, 2020. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-oil-demand-factbox-idUSKBN2870NY>. Acesso em: 27 mai. 2022.

SUNO, **Custo fixo e custo variável: Entenda a diferença entre os dois custos**, 2018. Disponível em: <https://www.suno.com.br/artigos/custo-fixo-e-custo-variavel/>. Acesso em: 05 out. 2022.

SVIECH, V.; MANTOVAN, E. A. Análise de investimentos: controvérsias na utilização da TIR e VPL na comparação de projetos. **Percursos**, v. 1, n. 13, p. 270-298, 2013.

TAVARES, A. N. et al. **Oportunidades enterradas**: Geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos. Vitória: EDUFES, 2019. E-book. Disponível em: https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/11417/1/Oportunidades_Enterradas.pdf. Acesso em: 19 de abr. 2022.

TECNOLOGIA, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016. Disponível em: <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/1140?mode=full>. Acesso em 29 abr. 2022.

TORRES, A.; PEDROSA, J. F.; MOURA, J. P. **Fundamentos da implantação de biodigestores em propriedades rurais**, 2012. Disponível em: <https://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=1248>. Acesso em 04 maio de 2022.

- VALÉRIO, G. F. **Análise termodinâmica do ciclo Brayton operando com gases oriundos de um biodigestor**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/24929/1/PB_DAMEC_2019_2_11.pdf Acesso em 24 out. 2022.
- VANEK, M. MITTERPACH, J. ZACHAROVA, A. Odour control in biogás plant – Case study. 15th INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE, 2015. **Actas do [...]**. Eslováquia: Technical University in Zvolen, Faculty of Ecology and Environmental Engineering, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304268149_ODOR_CONTROL_IN_BIOGAS_PLANT_-_CASE_STUDY. Acesso em 15 abr. 2022.
- VIEIRA, M. T.; MIRANDA, D. H. de; BASQUEROTTO, C. H. C. C. **Utilização do subproduto proveniente da produção de biogás como fertilizante**. Revista Conexão Eletrônica, v. 13, n. 1, 2016.
- WELTY, J. R. et al. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa**, ed. 6. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634201/>. Acesso em: 20 out. 2022.
- WR PRATES. **Finanças e Data Science**. 2018. Disponível em: <https://www.wrprates.com/> Acesso em: 12 ago. 2021
- WU, S. et al. Integrated approach to sustain biogas production in anaerobic digestion of chicken manure under recycle utilization of liquid digestate: Dynamics of ammonium accumulation and mitigation control. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 205, p.75-81, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241600033X>. Acesso em 26 abr. 2022.
- YANG, L. et al. Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 44, p. 824-834, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211500012X>. Acesso em 25 abr. 2022.
- ZANK, J. C. C., BRANDT, L. S., BEZERRA, R. C., PEREIRA, E. N. **As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis**, 2020. *Exacta*, p. 502-516. DOI: <https://doi.org/10.5585/ExactaEP.v18n3.10802>.
- ZHAO, Q. LEONHARDT, E. MACCONNEL, C. FREAR, C. CHEN, S. **Purification Technologies for biogas generated by anaerobic digestion. Climate Friendly Farmin. CSANR Research Report 2010 – 001, 2010**. Disponível em: <http://www.build-a-biogas-plant.com/PDF/BiogasPurificationTech2010.PDF>. Acesso em 02 mai. 2022.
- ZENATTI, D. C. **Biometano** – obtenção e aproveitamento. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. Universidade Federal do Paraná. 2019. Disponível em:

<https://palotina.ufpr.br/bioenergia/wp-content/uploads/sites/5/2019/05/Biogas.pdf>. Acesso em 16 jun 2022.

ZK SEPARATION. **Sludge dewatering centrifuge**. 2022. Disponível em: <https://www.zkcentrifuge.com/application/sludge-treatment.html>. Acesso em 02 nov. 2022.

ZORG BIOGAS. **Gasómetro de biogás de doble membrana, cúpula en forma de 2/5 D**, 2022. Disponível em: https://zorg-biogas.com/es/catalogo-de-equipos/sostenedor-de-biogas/sostenedor-de-biogas-de-doble-membrana-2_5d. Acesso em: 02 nov. 2022.

APÊNDICE A – Equações do balanço de massa

De acordo com Himmelblau e Riggs (2014), o balanço de massa de um processo é a expressão da Lei de Conservação de Massa, a qual expressa que: “Matéria não é criada nem destruída”. Sendo assim, o balanço de massa generalizado pode ser escrito como:

$$[Acúmulo] = [Entra] - [Sai] + [Gerado] - [Consumido] \quad (A1)$$

Os cálculos realizados neste trabalho utilizaram como considerações o regime permanente e um processo contínuo, transformando as massas em vazões, por meio do tempo de biodigestão de 30 dias. Apesar destas considerações, sabe-se que a biodigestão se trata de um processo que ocorre em regime transiente, com tempo de residência de 30 dias.

Para realização do cálculo da vazão de biogás purificada diária, utilizou-se a Equação A2. Onde \dot{Q} é a vazão volumétrica de biogás em $m^3.d^{-1}$, P é a potência em J/s, $(\%CH_4)$ é a fração volumétrica de metano no biogás purificado, PCI é o potencial calorífico inferior em relação ao gás metano e η é a eficiência média de uma turbina geradora a gás.

$$\dot{Q} = \frac{P}{(\%CH_4) * PCI * \eta} \quad (A2)$$

Para efetuar o cálculo da massa de biogás, foi utilizada a Equação A3, onde $m_{gás}$ é a massa do gás, $\rho_{gás}$ a densidade do mesmo e $V_{gás}$ seu volume.

$$m_{gás} = \rho_{gás} * V_{gás} \quad (A3)$$

Equação A4 apresenta o balanço para o componente metano, sendo o volume de controle a purificação geral. Essa é utilizada para encontrar o valor da corrente 9, ou seja, a quantidade de biogás gerada para a geração de energia desejada.

$$\dot{m}_9 * y_{9CH_4} = \dot{m}_{11} * y_{11CH_4} \quad (A4)$$

A.1 – Setor de Preparação de Matéria-Prima

O balanço de massa global para a retirada do material metálico é expresso pela Equação A5.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (\text{A5})$$

Desta forma, foi possível realizar o balanço de massa para os componentes metálicos e não metálicos, sendo essa etapa representado pelas Equações A6 e A7, respectivamente.

$$\dot{m}_1 * x_{1_{nm}} = \dot{m}_2 * x_{2_{nm}} + \dot{m}_3 * x_{3_{nm}} \quad (\text{A6})$$

$$\dot{m}_1 * x_{1_m} = \dot{m}_2 * x_{2_m} + \dot{m}_3 * x_{3_m} \quad (\text{A7})$$

Com isso, há duas incógnitas, as correntes \dot{m}_2 e \dot{m}_3 . Sendo que a corrente \dot{m}_1 possui um valor de $1000 \text{ ton.mês}^{-1}$, para a produção desejada de biogás e geração de energia. Portanto, possibilitou-se obter os valores das correntes \dot{m}_2 e \dot{m}_3 , por meio das Equações A6 e A7.

$$\dot{m}_2 = 0,9833 * 1000 = 983,33 \text{ ton/mês}$$

$$\dot{m}_3 = 0,0167 * 1000 = 16,7 \text{ ton/mês}$$

Para a separação do material orgânico do inorgânico, realizou-se o balanço de massa global presente na equação A8.

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad (\text{A8})$$

Também se realizou o balanço de massa por componente, gerando assim as equações A9 e A10.

$$\dot{m}_2 * x_{2_{org}} = \dot{m}_4 * x_{4_{org}} + \dot{m}_5 * x_{5_{org}} \quad (\text{A9})$$

$$\dot{m}_2 * x_{2_{inorg}} = \dot{m}_4 * x_{4_{inorg}} + \dot{m}_5 * x_{5_{inorg}} \quad (A10)$$

Isolando \dot{m}_5 na Equação A8 e substituindo-o na Equação A9, foi possível encontrar o valor de \dot{m}_4 , sendo esse equivalente a 765,9 ton.mês⁻¹. Com o resultado da corrente \dot{m}_4 , encontra-se a corrente \dot{m}_5 , sendo essa igual a 217,4 ton.mês⁻¹.

A.2 – Biodigestor

O balanço de massa no biodigestor considerando as correntes de entrada e saída, está expresso na Equação A11. Para a transformação de massa para vazões mássicas, utilizou-se o tempo de residência da biodigestão de 30 dias.

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_7 + \dot{m}_8 = \dot{m}_9 + \dot{m}_{10} \quad (A11)$$

Destas correntes representadas na equação acima, tem-se o conhecimento da vazão mássica e composição da corrente 6 (765,9 ton.mês⁻¹), a qual é oriunda do balanço material anterior. Sabe-se que a diluição de referência é de 20% de sólidos totais, possibilitando encontrar a massa de água necessária a partir da massa de material sólido (6). Assim, calcula-se a corrente 7:

$$\dot{m}_7 = \frac{765,7 * 0,8}{0,2} = 3063,6 \text{ ton.mês}^{-1}$$

Uma corrente encontrada por meio de dados de comparação da literatura foi a de inóculo (8), a qual por meio das explicações apresentadas no Tópico 8.2, apresentou o valor de 250 ton.mês⁻¹. Além destas, tem-se conhecimento da vazão de biogás produzida por meio do valor do rendimento da biodigestão da matéria orgânica, realizada pelas bactérias presentes no lodo da ETE. Tal explicação está presente no Tópico 8, juntamente com a referência utilizada. A vazão mássica de biogás produzida na biodigestão encontrada foi de 512,80 ton.mês⁻¹. Desta forma, em posse das vazões das correntes 6, 7, 8 e 9, conseguiu-se calcular a vazão da corrente 10, a qual apresentou valor de 3.566,70 ton.mês⁻¹.

A.3 – Purificação

Para o volume de controle do segundo compressor de gás CG-202, tem-se a entrada da corrente de biogás oriundo do primeiro compressor (\dot{m}_{13}), juntamente com a fração de metano que é redirecionada à coluna de absorção (\dot{m}_{18}). Como corrente de saída tem-se a de numeração 14. Sabe-se dos balanços materiais anteriores que a corrente de biogás possui vazão mássica de 17.093,60 kg.d⁻¹.

Desta forma, o balanço global para o volume de controle deste compressor está apresentado na Equação A12 a seguir.

$$\dot{m}_{13} + \dot{m}_{18} = \dot{m}_{14} \quad (\text{A12})$$

Além disso, sabe-se que a posterior operação de absorção física de purificação, na qual os gases de impurezas possuem uma alta solubilidade no solvente, o vaso *flash* não possui finalidade de separação, mas sim de redução de pressão, para que caso uma pequena fração de metano seja absorvida, este se separe e retorne à coluna de absorção. Sendo assim, de acordo com a literatura, 5% de metano é vaporizado e realimentado na pressão de operação do primeiro compressor. (RYCKEBOSCH *et al.*, 2011). Desta forma, tem-se a relação descrita pela Equação A13.

$$\dot{m}_{18} = 0,05 * \dot{m}_{13} * y_{13CH_4} \quad (\text{A13})$$

Por meio do conhecimento prévio da corrente 13 e sua fração de metano (17.093,60 kg.d⁻¹ e 0,41, respectivamente), tem-se que \dot{m}_{18} é 352,24 kg.d⁻¹. Através da aplicação da Equação A12, tem-se que \dot{m}_{14} possui o valor de 17.445,90 kg.d⁻¹.

Os balanços por componente para este volume de controle estão apresentados pelas equações A14, A15, A16 e A17.

$$\dot{m}_{14} * y_{14CH_4} = \dot{m}_{13} * y_{13CH_4} + \dot{m}_{18} * y_{18CH_4} \quad (\text{A14})$$

$$\dot{m}_{14} * y_{14CO_2} = \dot{m}_{13} * y_{13CO_2} \quad (\text{A15})$$

$$\dot{m}_{14} * y_{14H_2S} = \dot{m}_{13} * x_{13H_2S} \quad (\text{A16})$$

$$\dot{m}_{14} * y_{14_{NH_3}} = \dot{m}_{13} * x_{13_{NH_3}} \quad (A17)$$

Através da substituição dos valores de vazões e composições conhecidas, encontrou-se a composição da corrente 14, sendo essa de 0,42, 0,38, 0,06 e 0,14, para o CH_4 , CO_2 , NH_3 e H_2S , respectivamente.

Considerando como volume de controle a coluna de absorção, foi possível realizar o balanço de massa global, com as entradas e saídas, para esse equipamento, como demonstrado na Equação A18.

$$\dot{m}_{16} + \dot{m}_{17} = \dot{m}_{15} + \dot{m}_{26} \quad (A18)$$

Também foi possível realizar o balanço de massa para cada componente, sendo essas o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) e Selexol®, como descrito nas Equações A19, A20, A21, A22 e A23.

$$\dot{m}_{15} * y_{15_{CH_4}} = \dot{m}_{17} * y_{17_{CH_4}} + \dot{m}_{16} * y_{16_{CH_4}} \quad (A19)$$

$$\dot{m}_{15} * y_{15_{CO_2}} = \dot{m}_{17} * y_{17_{CO_2}} + \dot{m}_{16} * y_{16_{CO_2}} \quad (A20)$$

$$\dot{m}_{15} * y_{15_{H_2S}} = \dot{m}_{16} * x_{16_{H_2S}} \quad (A21)$$

$$\dot{m}_{15} * y_{15_{NH_3}} = \dot{m}_{16} * x_{16_{NH_3}} \quad (A22)$$

$$\dot{m}_{26} * x_{26_{selexol}} = \dot{m}_{16} * x_{16_{selexol}} \quad (A23)$$

O sistema de incógnitas acima é impossível, dado que existem 5 equações Linearmente Independentes (LI) e 6 incógnitas, resultando em um grau de liberdade 1. Para solucionar tal problemática, é preciso determinar a vazão de solvente necessária para a realização da completa absorção das impurezas presentes no biogás. De acordo com Magalhães et al. (2004), tal vazão pode ser calculada pela equação A24. Com a finalidade de simplificação dos cálculos, considerou-se a remoção apenas do dióxido de carbono, impureza com valores mais significativos.

$$V_S = \frac{V_B}{S * P} * \frac{N}{100} \quad (A24)$$

Onde V_S é o volume do solvente, S a solubilidade do dióxido de carbono no solvente, P a pressão de operação na coluna e N a fração de dióxido de carbono (v/v). A solubilidade do gás carbônico no solvente Selexol® é de $3628,44 \text{ cm}^3 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ (CHEN, 2003). Assim, tem-se o cálculo do volume do solvente orgânico:

$$V_S = \frac{12.240.397,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}}{3628,44 \text{ cm}^3 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1} * 6,91 \text{ atm}} * \frac{20}{100}$$

$$V_S = 674,7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} = 40,48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Em posse da densidade do Selexol® de $1031 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, calcula-se a vazão mássica de solvente, representada no processo pela numeração 16:

$$\dot{m}_{26} = \frac{40,48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{1031 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 1.001.686,61 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$$

Com a finalidade de garantia de uma operação de absorção eficiente, considerou-se um fator de correção de 1,75 para a vazão de solvente, de acordo com Welty et al. (2017), resultando em uma corrente de $1.752.951,57 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$.

Desta forma, o sistema de incógnitas passa a ter um GL igual a 0, podendo ser resolvido por seguidas substituições das equações. Os resultados deste sistema estão apresentados no Tópico 8.3.1.

Também foram realizados os balanços de massa, para o vaso *flash*, sendo iniciado com o balanço de massa global, sendo esse com entrada e saída, assim como apresenta a Equação A25.

$$\dot{m}_{19} + \dot{m}_{18} = \dot{m}_{16} \quad (\text{A25})$$

Em seguida, realizou-se os balanços de massa por componente, sendo esses o dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) e Selexol®, representados nas Equações A26, A27, A28 e A29, respectivamente.

$$\dot{m}_{16} * x_{16\text{CO}_2} = \dot{m}_{19} * x_{19\text{CO}_2} \quad (\text{A26})$$

$$\dot{m}_{16} * x_{16_{H_2S}} = \dot{m}_{19} * x_{19_{H_2S}} \quad (A27)$$

$$\dot{m}_{16} * x_{16_{NH_3}} = \dot{m}_{19} * x_{19_{NH_3}} \quad (A28)$$

$$\dot{m}_{16} * x_{16_{selexol}} = \dot{m}_{19} * x_{16_{selexol}} \quad (A29)$$

Tem-se a vazão mássica da corrente 16 (1.763.134,79 kg.d⁻¹) e da corrente 18 (352,24 kg.d⁻¹) através dos balanços materiais anteriores, possibilitando então encontrar \dot{m}_{19} por meio da aplicação da Equação A25, a qual apresentou valor de 1.762.782,55 kg.d⁻¹. Em posse deste valor e das equações dos balanços de massa por componente, encontrou-se a composição da corrente 19, dados estes expressos na Tabela 14.

Por fim, para a purificação fez-se a análise do balanço de massa global do aso regenerador como volume de controle, estando apresentada na Equação A30.

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22} + \dot{m}_{23} \quad (A30)$$

Em seguida, com a finalidade de dar continuidade à estrutura de determinação das correntes e frações mássicas, fez-se a descrição do balanço material para os seguintes componentes: solvente (*Selexol*), dióxido de carbônico (CO_2), gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3) expressa nas Equações A31, A32, A33 e A34.

$$\dot{m}_{21} * x_{21_{selexol}} = \dot{m}_{23} * x_{23_{selexol}} \quad (A31)$$

$$\dot{m}_{21} * x_{21_{CO_2}} = \dot{m}_{22} * x_{22_{CO_2}} \quad (A32)$$

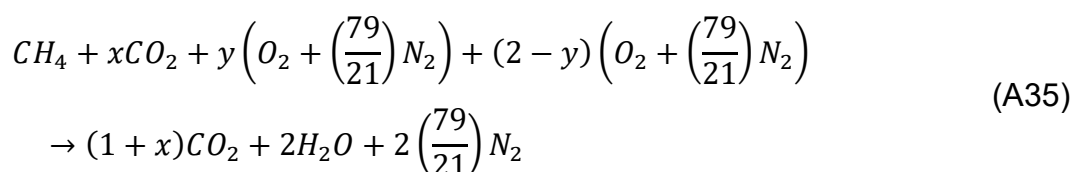
$$\dot{m}_{21} * x_{21_{H_2S}} = \dot{m}_{22} * x_{22_{H_2S}} \quad (A33)$$

$$\dot{m}_{21} * x_{21_{NH_3}} = \dot{m}_{22} * x_{22_{NH_3}} \quad (A34)$$

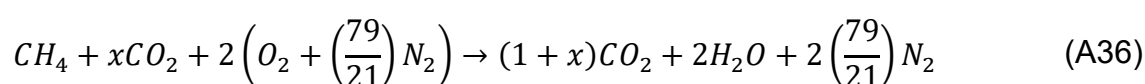
Assim, através da resolução deste sistema de equações, foi possível determinar o valor das correntes \dot{m}_{22} e \dot{m}_{23} , bem como suas composições, representados na Tabela 17.

A.4 – Geração de Energia

Os valores conhecidos são da corrente \dot{m}_{17} e de suas frações $y_{17_{CH_4}}$ e $y_{17_{CO_2}}$, sendo esses conhecidos em unidade mássica. Para encontrar os valores dos demais, é de suma importância utilizar a reação de combustão para o metano (CH_4), essa é dada pela Equação A35 (CHANG *et al.*, 2019).



Na Equação A35, a parte $CH_4 + xCO_2 + y\left(O_2 + \left(\frac{79}{21}\right)N_2\right)$ representa a composição do biogás, $(2 - y)\left(O_2 + \left(\frac{79}{21}\right)N_2\right)$ representa o ar de entrada e $(1 + x)CO_2 + 2H_2O + 2\left(\frac{79}{21}\right)N_2$ são os gases de exaustão. Como o biogás é purificado e consiste, basicamente, em biometano, não há a presença de O_2 e N_2 na composição do biogás, desta forma, o coeficiente y é equivalente a zero. A Equação A35, torna-se a Equação A36.



O coeficiente x pode ser encontrado por meio da estequiometria da reação, então, a massa de metano foi calculada e, a partir da sua massa molar, foi transformada em unidade molar. Sendo \dot{m}_{17} equivalente a $7262,6 \text{ kg.d}^{-1}$, a massa de metano diária será:

$$m_{CH_4} = 7262,6 * 0,97 = 7044,75 \text{ Kg. dia}^{-1}$$

A massa molar do metano equivale a $16,04 \text{ kg.kmol}^{-1}$, desta forma, obteve-se

$$n_{CH_4} = \frac{7044,75}{16,04} = 440,3 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

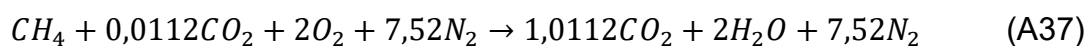
O número de mols do dióxido de carbono foi calculado de forma análoga, sendo sua massa molar igual a 44 kg.kmol⁻¹.

$$n_{CO_2} = 7262,6 * 0,03 * 44 = 4,95 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

A partir desses valores, encontrou-se o valor do coeficiente x, por meio de uma simples regra de três.

$$x = \frac{4,95}{439,2} = 0,0112$$

Portanto, a reação de combustão para o metano é descrita pela Equação A37.



Posteriormente, calculou-se a quantidade de ar necessária, partindo da Equação A37, por meio da estequiometria da reação, obteve-se as seguintes quantidades de mols para o oxigênio e nitrogênio, respectivamente.

$$n_{O_2} = 2 * 439,2 = 880,6 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

$$n_{N_2} = 7,52 * 439,2 = 3312,7 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

Sendo a massa molar do oxigênio igual a 32 kg.kmol⁻¹ e do nitrogênio 28 kg.kmol⁻¹, foi possível encontrar a massa de cada um desses componentes.

$$m_{O_2} = 878,4 * 32 = 28178,99 \text{ Kg. dia}^{-1}$$

$$m_{N_2} = 3304,45 * 28 = 92755,85 \text{ Kg. dia}^{-1}$$

A corrente \dot{m}_{31} consiste na soma de m_{O_2} e m_{N_2} , desta forma, \dot{m}_{31} equivale a 120934,8 kg.d⁻¹. Porém, para que aconteça a combustão completa, precisa-se de um excesso de 14 a 15% do ar de entrada (SILVA, 2011).

Desta forma, o real valor da corrente \dot{m}_{31} será:

$$\dot{m}_{31} = 120633,3 + 0,15(28108,7 + 92524,54) = 139075,1 \text{ Kg. dia}^{-1}$$

Esse valor pode ser passado em unidades molares, para o ar com uma massa molar equivalente a 29 kg/kmol, o valor de \dot{m}_{31} se torna:

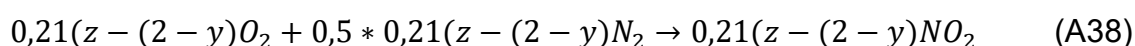
$$\dot{m}_{31} = \frac{139075,1}{29} = 4795,7 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

Sabe-se que a composição molar do ar equivale a 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, o número de mols, considerando o excesso, para O_2 e N_2 , respectivamente, torna-se:

$$n_{O_2} = 4795,7 * 0,21 = 1007,1 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

$$n_{N_2} = 4795,7 * 0,79 = 3788,6 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

A reação presente na Equação A38, representa a reação de oxidação do nitrogênio. Por meio dessa, é possível encontrar o valor de NO_2 que poderá estar presente na corrente de saída, mesmo que mínimo (CHANG *et al.*, 2019).



Então $(z - (2 - y))$ representa o excesso de oxigênio, esse excesso pode ser calculado como a diferença:

$$\text{excesso } O_2 = 1007,1 - 880,6 = 126,5 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

Pela estequiometria da reação, presente na Equação A32, a relação entre O_2 e NO_2 é equivalente 1:1, sendo assim, o número de mols de NO_2 em excesso também será de 126,5 kmol por dia. Já o excesso de N_2 equivale à metade desse valor.

Com os dados obtidos, torna-se possível calcular o valor da corrente \dot{m}_{29} , por meio da reação, descrita pela Equação A36, calculou-se o número de mols para CO_2 ,

N_2 e H_2O , respectivamente, relacionando esses com número de mols de metano encontrado.

$$n_{CO_2} = 440,3 * 1,0112 = 445,25 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

$$n_{N_2} = 3788,6 - \frac{126,5}{2} = 3725,35 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

$$n_{H_2O} = 440,3 * 2 = 880,6 \text{ Kmol. dia}^{-1}$$

Portanto, o valor da corrente \dot{m}_{29} é a soma do número de mols para CO_2 , N_2 , H_2O e o excesso de NO_2 , assim, \dot{m}_{29} é igual a 5240,9 kmol.d⁻¹.

A.5 – Tratamento para Obtenção do Biofertilizante

Para a peneira, o balanço de massa global é dado pela Equação A39.

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{34} + \dot{m}_{35} \quad (\text{A39})$$

Onde $\dot{m}_{10} = 3566,7 \text{ ton.mês}^{-1}$, \dot{m}_{34} representa a corrente total de material retirado, ou seja, fração de matéria inorgânica que foi assumida na entrada do processo sendo essa equivalente a 2,5%, então $x_{34_{inorg}} = 0,025$ e análogo para \dot{m}_{35} , dessa vez para a matéria orgânica, sendo a fração $x_{35_{org}} = 0,975$. Assim o balanço por componente segue conforme as Equações A40 e A41.

$$\dot{m}_{35} = \dot{m}_{10} * x_{10_{org}} \quad (\text{A40})$$

$$\dot{m}_{35} = 3477,5 \text{ ton. mês}^{-1}$$

$$\dot{m}_{34} = \dot{m}_{10} * x_{10_{inorg}} \quad (\text{A41})$$

$$\dot{m}_{34} = 82,9 \text{ ton. mês}^{-1}$$

Para o decantador, o balanço de massa global é descrito pela Equação A37.

$$\dot{m}_{35} = \dot{m}_{36} + \dot{m}_{37} \quad (\text{A42})$$

Assim, a Equação A42 tem \dot{m}_{37} representando a parte líquida inicialmente retirada do decantador sendo 72% do volume total de matéria limpa e \dot{m}_{36} a parte líquida/sólida que será encaminhada para o filtro.

Portanto o balanço por componente é mostrado nas Equações A43 e A44.

$$\dot{m}_{37} = \dot{m}_{35} * 0,72 \quad (\text{A43})$$

$$\dot{m}_{37} = 2503,8 \text{ ton.mês}^{-1}$$

$$\dot{m}_{36} = \dot{m}_{35} * 0,28 \quad (\text{A44})$$

$$\dot{m}_{36} = 973,7 \text{ ton.mês}^{-1}$$

Por fim, para a realização do balanço de massa no filtro, considerou-se que a corrente \dot{m}_{38} representa o biofertilizante sólido final, correspondendo a 71,5% da corrente \dot{m}_{36} , e a corrente \dot{m}_{39} é o biofertilizante líquido, composto por 28,5% da corrente \dot{m}_{36} o balanço de massa global é descrito pela Equação A45.

$$\dot{m}_{36} = \dot{m}_{38} + \dot{m}_{39} \quad (\text{A45})$$

O balanço para o biofertilizante líquido e sólido é expresso pelas Equações A46 e A47, respectivamente.

$$0,715 * \dot{m}_{36} = \dot{m}_{38} \quad (\text{A46})$$

$$0,285 * \dot{m}_{36} = \dot{m}_{39} \quad (\text{A47})$$

Desta forma, pode-se obter para \dot{m}_{38} um valor de 695,5 toneladas por mês e \dot{m}_{39} equivale a 278,2 toneladas por mês.

APÊNDICE B – Descrição dos cálculos do balanço de energia e integração energética

De acordo com Moran (2018), o balanço energético de um processo expressa a junção de três contribuições macroscópica. A primeira delas está associada ao movimento do sistema como um todo, enquanto a segunda faz referência a posição de um sistema no campo terrestre gravitacional e, por fim, a terceira diz respeito à variação de entalpia, de acordo com a Equação B1.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \left(\dot{H}_e + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot z_0 \right) - \sum \dot{m}_s \left(\dot{H}_s + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot z \right) \quad (\text{B1})$$

Para os balanços energéticos realizados, adotou-se regime permanente e desconsiderou-se as contribuições oriundas da energia cinética e potencial.

B.1 – Biodigestor

Com a finalidade de calcular o calor liberado pelo conjunto de reações de digestão anaeróbia da matéria orgânica, utiliza-se o dado da entalpia de formação do biogás de 142 kJ.mol⁻¹ de glicose, a 35°C (MUVHIIWA, 2015). Assim, o calor liberado pela reação, em kW pode ser calculada pela Equação B2 apresentada abaixo:

$$Q = \Delta H * \dot{M} * x_{MO} \quad (\text{B2})$$

Onde ΔH é a entalpia de formação do biogás, M a vazão mássica de matéria orgânica total e x_{MO} é a fração de matéria orgânica frente à diluição realizada.

Para a realização dos cálculos, converteu-se a entalpia da reação em base molar para base mássica, obtendo o valor de 788,21 kJ.kg⁻¹, dado que a massa molar da glicose é de 0,18 kg.mol⁻¹. Desta forma, sabendo o valor da variação da entalpia através da literatura, a massa oriunda do processo de 0,20 kg.s⁻¹ e a fração utilizada na diluição de 0,2, calcula-se o calor abaixo.

$$Q = \frac{788,21 \text{ kJ} * 0,20 \text{ kg} * 0,20}{\text{kg} * \text{s}} = 31,2 \text{ kJ/s}$$

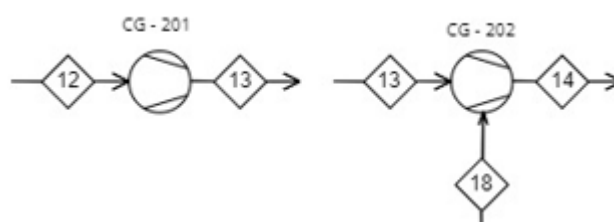
Como explicado no Tópico 8.2.1, para que a manutenção da temperatura seja mantida em 35°C no reator, optou-se pela utilização de um trocador de calor

encamisado ao reator, de forma que a água que passa pela camisa do reator seja responsável pela absorção do calor gerado na reação. Para este trocador, não há a necessidade da realização do cálculo do calor, dado que este valor é de 31,2 kW, magnitude esta liberada na reação de formação do biogás. No dimensionamento deste equipamento, será determinada a vazão de água necessária, bem como a temperatura de saída da água após a absorção do calor.

B.2 – Purificação

Os balanços energéticos da seção de purificação do biogás têm início nos equipamentos de utilidades que visam a compressão do biogás para posterior absorção. Os equipamentos TG-201 e FS-201 não apresentam variação de energia, por isso não possuem balanço energético. A Figura B1 representa os volumes de controle referentes à utilização dos compressores CG-201 e CG-202 apresentados no PFD do processo. O primeiro compressor possui a finalidade de elevar a pressão atmosférica para 4 bar, enquanto o segundo tem como objetivo incrementar a pressão até a pressão de operação da coluna de absorção – 7 bar.

Figura B 1 – Sistema de compressão do biogás



Fonte: Autoria própria (2022)

Considerando que a operação destes equipamentos é em regime permanente, sem a consideração das contribuições cinéticas e potenciais e sem troca térmica (compressor adiabático), tem-se a necessidade do cálculo do trabalho requerido por estes compressores. Para a determinação desta variável, fez-se uso do *software* de simulação COCO. Assim, adicionando as características da corrente 12 e a pressão desejada de saída em cada compressor, considerando uma eficiência isoentrópica de 75%, encontrou-se os valores de trabalho requerido em cada utilidade. Tais

resultados, bem como a elevação das temperaturas após a compressão, estão expressos nas Tabela 10 e 11.

Outro equipamento presente na seção de purificação que demanda uma avaliação energética, é a bomba hidráulica BH-201. Esta utilidade tem a função de elevar a pressão do solvente regenerado oriundo do vaso regenerador, da pressão atmosférica, até a pressão de operação da coluna de absorção. Sendo assim, como citado anteriormente, o solvente Selexol® deverá ser bombeado para atingir 7 bar. A Figura B2 explicita o volume de controle adotado para esta análise.

Figura B 2 – Sistema de bombeamento do solvente regenerado



Fonte: Autoria própria (2022)

Desta forma, conhecendo as informações da corrente 25, como temperatura, pressão, vazão mássica, composição e, além disso, a pressão desejada de saída, utilizando uma eficiência isoentrópica de 75%, é possível simular tal operação no *software* COCO. Os resultados desta simulação estão apresentados na Tabela 18.

Prosseguindo com os balanços de energia na seção de purificação, nota-se a necessidade da realização deste estudo para os equipamentos responsáveis pelas trocas térmicas. O primeiro trocador de calor é o TC-201, o qual possui a função de resfriar o biogás comprimido até a temperatura de operação da coluna (25°C), sendo que o volume de controle escolhido para o mesmo está presente na Figura B3.

Figura B 3 – Sistema de troca térmica do biogás



Fonte: Autoria própria (2022)

O estudo energético deste volume de controle foi realizado também por meio do COCO, dado que se tem conhecimento das condições e composição da corrente de entrada, além da temperatura desejada na saída. Por meio da simulação, encontrou-se o calor liberado nesta troca térmica, valor este presente na Tabela 12.

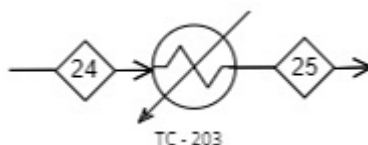
Como discorrido no Tópico 8.4.3, nota-se a possibilidade da realização de uma integração energética entre as correntes 20 e 24, representadas no PFD. Com a finalidade de se ter uma análise completa das vantagens desta integração, será realizado abaixo o balanço de energia para os trocadores de calor sem integração energética. Assim, o primeiro trocador de calor possui a função de elevar a mistura do solvente com impurezas absorvidas até 100 °C, enquanto o segundo de resfriar a corrente de solvente regenerado até 25°C. Os volumes de controle destes trocadores estão representados nas Figuras B4 e B5.

Figura B 4 – Sistema de troca térmica sem integração energética do solvente com impurezas



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura B 5 – Sistema de troca térmica sem integração energética do solvente regenerado



Fonte: Autoria própria (2022)

Para o cálculo dos balanços de energia destes volumes de controle, utilizou-se a Equação B1, considerando regime permanente, desprezando contribuições cinéticas ou potenciais e, desconsiderando o termo de trabalho. A equação resultante está expressa abaixo:

$$Q = \dot{m} * \Delta H = \dot{m} * cp * \Delta T \quad (B3)$$

Assim, para o TC-202, tendo o cp da corrente com o valor de 2,06 kJ.kg⁻¹.°C⁻¹, encontrado através de média ponderada do cp do solvente e das impurezas, a vazão mássica de 1.762.782,55 kg.d⁻¹ e as temperaturas de entrada e saída, tem-se:

$$Q = \dot{m}_{20} * cp_{20} * (T_{21} - T_{20})$$

$$Q = 1.762.782,55 * 2,06 * (100 - 25) = 3.145.084,43 \text{ W}$$

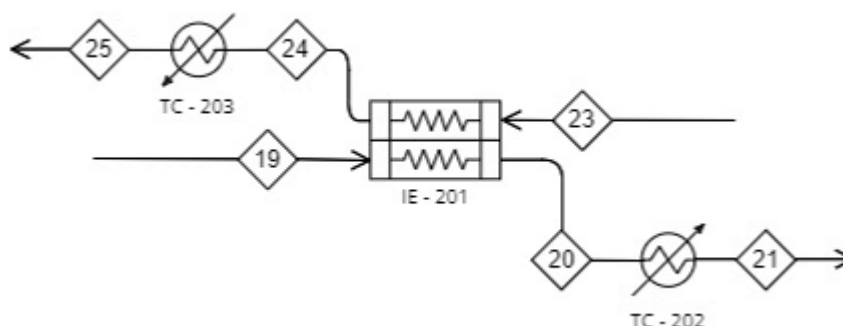
Já para o TC-203, considerando o cp do solvente Selexol® de $2,06 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ (SIEFERT, 2015):

$$Q = \dot{m}_{24} * cp_{24} * (T_{25} - T_{24})$$

$$Q = 1.752.951,57 * 2,06 * (25 - 100) = -3.134.618,25 \text{ W}$$

O sistema de troca térmica com a integração energética citada acima, está representado na Figura B6. Nele se tem o equipamento Integrador Energético IE-201, realizando este cruzamento de correntes, acompanhado de dois trocadores de calor (TC-202 e TC-203) de utilidades que terminarão de realizar o aquecimento e resfriamento das mesmas.

Figura B 6 – Sistema de troca térmica com integração energética

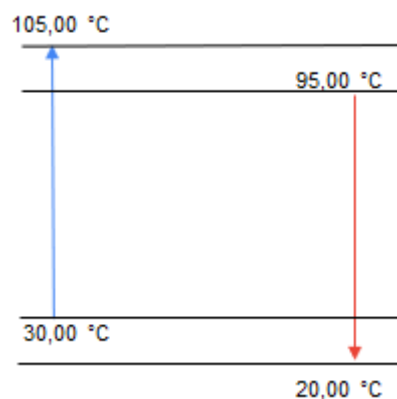


Fonte: Autoria própria (2022)

Para iniciar este estudo de integração, estipulou-se um valor de ΔT_{min} de 10°C , sendo este o valor da variação de temperatura do Ponto *Pinch*, no qual não há consumo algum de utilidade. Assim, a corrente 19 entra neste volume de controle a 25°C e sai a 100°C , enquanto a corrente 23 entra a 100°C e necessita ser resfriada até 25°C . Com a finalidade da realização dos cálculos integrativos, adicionou-se 5°C às temperaturas das correntes de entrada 19 e 23, enquanto subtraiu-se este mesmo valor das temperaturas das correntes de saída 21 e 25. Com estes dados elaborou-

se o Diagrama Cascata, representado na Figura B7, onde a corrente azul é a que necessita ser aquecida e a vermelha, que necessita ser resfriada.

Figura B 7 – Diagrama Cascata

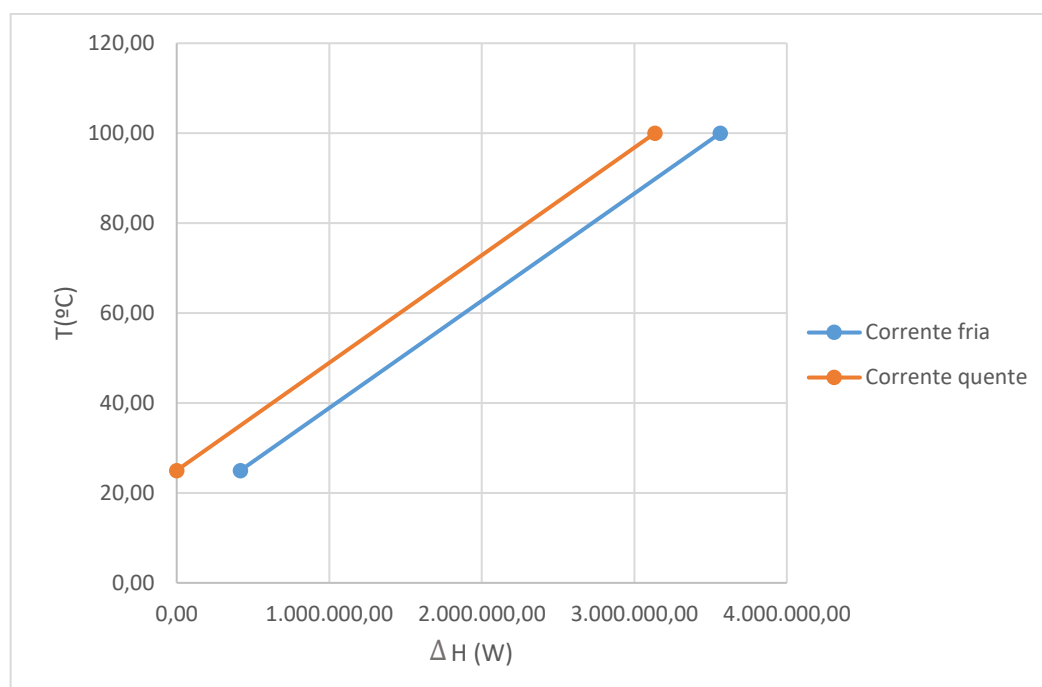


Fonte: Autoria própria (2022)

Neste gráfico, pode-se constatar que a região onde há integração entre as duas correntes está entre 30 e 95°C, explicitando a necessidade de trocadores de calor de utilidades para finalizar o aquecimento e o resfriamento destas correntes. Com base nisto, é necessário contabilizar o calor necessário fornecido ou retirado pelas utilidades quentes e frias, utilizando a Equação B3. Desta forma, em posse dos calores específicos de cada corrente, bem como as vazões mássicas, encontrou-se que haveria a necessidade de adicionar 428.415,28 W para finalizar o aquecimento da corrente 20 e retirar 417.949,10 W para resfriar a corrente 24.

Com estes dados, elaborou-se o Diagrama Temperatura *versus* Entalpia, presente na Figura B8.

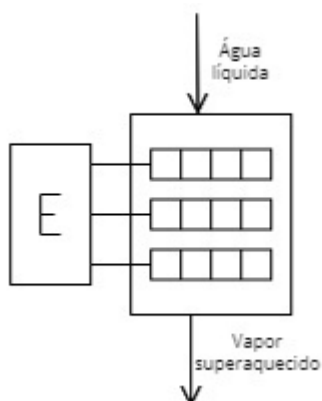
Figura B 8 – Diagrama Temperatura versus Entalpia



Fonte: Autoria própria (2022)

Por fim, necessita-se realizar o balanço de energia da caldeira, equipamento este utilizado para obtenção de vapor d'água. O volume de controle que representa esta etapa do processo está representado pela Figura B9.

Figura B 9 – Caldeira



Fonte: Autoria própria (2022)

Considerou-se que a água entra a 25°C na caldeira, sendo que deverá sair a 130°C, como vapor superaquecido. Escolheu-se esta temperatura de saída para que o vapor superaquecido, ao ser transportado até sua utilização, esteja como vapor saturado a 110°C, temperaturas estas considerando a pressão de 1 bar. Conhecendo

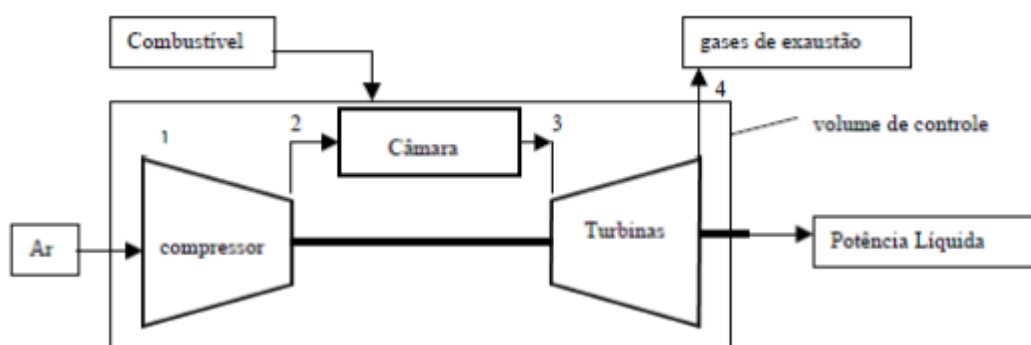
a vazão mássica de água ($691,55 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) e as temperaturas de entrada e saída, através da simulação realizada no *software* COCO, obteve-se que há a necessidade de um fornecimento de calor de 529.052 W .

B.3 – Geração de energia elétrica

Para a realização do balanço de energia na turbina, utilizou-se o ciclo de Brayton, sendo esse um ciclo termodinâmico que consiste na adição de calor, de forma que a pressão seja constante. Nele o sistema ocorre em uma série de quatro processos: dois processos isentrópicos alternados com dois processos isobáricos (CONNOR, 2020).

A Figura B10, apresenta o comportamento do ciclo de Brayton.

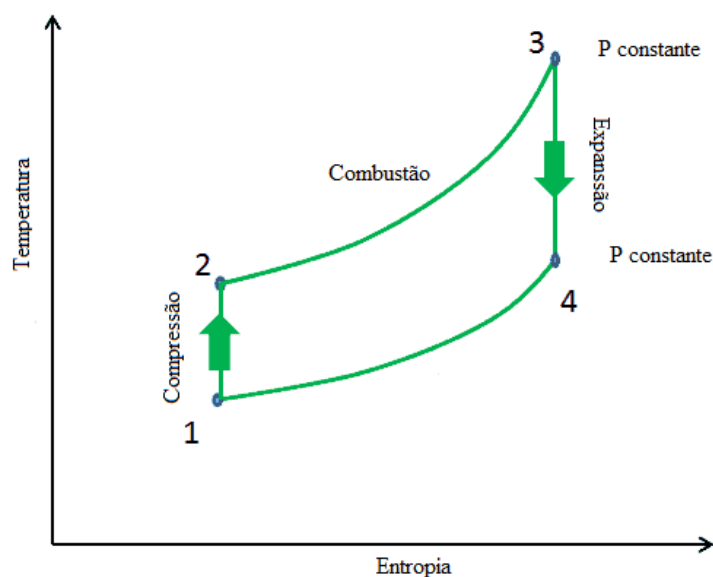
Figura B 10 - Representação do ciclo de Brayton



Fonte: Queiroz e Matias (2003)

A Figura B11 representa o ciclo por meio de um diagrama Temperatura *versus* entropia, apresentando onde há compressão, combustão e expansão.

Figura B 11 - Digrama Temperatura versus Entropia



Fonte: Adaptado Connor (2020)

Relacionando o ciclo com as correntes do processo, tem-se que o processo 1 é a corrente \dot{m}_{31} , o 2 é a corrente \dot{m}_{32} , o 3 é a corrente \dot{m}_{28} e, por fim, o 4 é a corrente \dot{m}_{29} .

Primeiramente, realizou-se os cálculos da compressão, sendo o volume de controle representado pela Figura B12.

Figura B 12 – Sistema de compressão do ar



Fonte: Autoria Própria (2022)

Segundo Valério (2019), as condições de pressão e temperatura da corrente \dot{m}_{31} equivale a 1 atm e 300 K, respectivamente, já a pressão para a corrente \dot{m}_{32} é igual a 8 atm. Para encontrar a temperatura de saída utilizou-se a Equação B4, na qual a razão entre calores específicos a pressão e volume constantes (k) é dada com o valor de 1,4.

$$T_{\dot{m}_{32}} = T_{\dot{m}_{31}} * \left(\frac{P_{\dot{m}_{32}}}{P_{\dot{m}_{31}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (\text{B4})$$

Desta forma, a temperatura de saída do compressor é de 543,43 K.

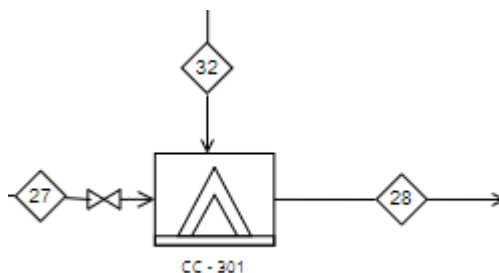
A partir das temperaturas, foi possível calcular o trabalho necessário para a compressão, pela Equação B5.

$$-\dot{W} = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (\text{B5})$$

O valor de c_p para o ar, segundo Luz (2022) é de $1,0048 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ e a vazão mássica \dot{m} para esse volume de controle é equivalente da corrente \dot{m}_{31} . Desta forma, o trabalho necessário é $393.728,42 \text{ W}$.

O segundo volume de controle adotado está presente na Figura B13, no qual representa o processo de combustão dos gases.

Figura B 13 - Câmara de combustão



Fonte: Autoria Própria (2022)

A segunda etapa do sistema, consiste em um processo isobárico, desta forma, a pressão da corrente \dot{m}_{28} é de 8 atm. Para encontrar a temperatura dessa corrente, é necessário calcular o calor gerado, no caso a entalpia de combustão do metano, conforme a Equação B3, sendo necessário a variação da entalpia do combustível, ou seja, do metano.

$$\dot{Q} = \dot{m} * \Delta H = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (\text{B3})$$

A ΔH do metano equivale a $890,4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (FOGAÇA, 2018), já a vazão molar desse é igual a $440,3 \text{ kmol} \cdot \text{d}^{-1}$, portanto o calor gerado é de $392.040.237,33 \text{ kJ} \cdot \text{d}^{-1}$.

Com o valor do calor gerado pelo metano, pode-se calcular a variação de temperatura, pela Equação B6.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} * c_p} \quad (B6)$$

A vazão mássica, por sua vez, é proveniente da corrente \dot{m}_{28} , 146.337,7 kg/d e o c_p é de 1,39 kJ.(kg.K)⁻¹, sendo esse dos gases exaustão. Desta forma, a variação de temperatura é 1.941,39 K, resultando em uma temperatura de 2.484,82 K para a corrente \dot{m}_{28} .

Segundo Valério (2019), a temperatura de operação em uma turbina a gás não pode passar de 1773 K. Como solução para esse problema, é necessário a injeção de uma grande quantidade de ar no processo, de 265.226,40 kg.d⁻¹, devido a quantidade de biogás purificado que está queimando.

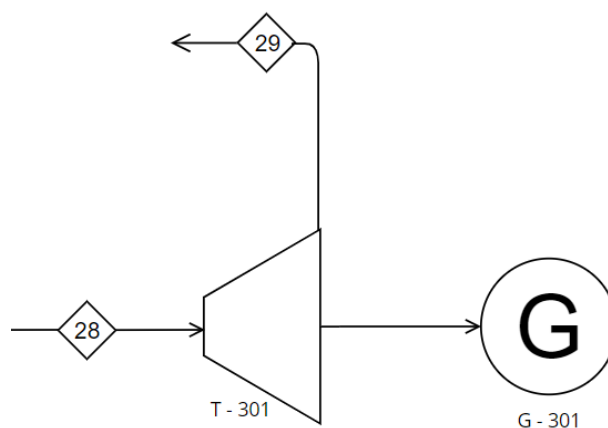
Com o excesso de ar, a vazão mássica passa a ter um valor de 411.564,10 kg.d⁻¹. Então o novo valor da variação de temperatura é de 687,95 K, obtendo-se uma temperatura de 1.231,39 K.

O calor adicionado no sistema pode ser calculado, por meio da Equação B3.

Sendo a vazão mássica correspondente a de ar que entra no sistema, corrente \dot{m}_{31} , o c_p do ar equivalente a 1,0048 kJ.(kg.K)⁻¹, obtendo-se um calor adicionado de 1.112.686,57 W.

O terceiro volume de controle é a expansão dos gases, como apresentado na Figura B14.

Figura B 14 - Sistema de expansão dos gases



Fonte: Autoria Própria (2022)

Essa fase se encaixa como um processo isentrópico, desta forma, as pressões das correntes \dot{m}_{28} e \dot{m}_{29} se diferem, porém, a pressão da corrente \dot{m}_{29} é igual à da corrente \dot{m}_{31} , já que entre essas duas o processo é isobárico.

Para encontrar o valor da temperatura da corrente \dot{m}_{29} , calculou-se de forma análoga ao primeiro volume de controle, ou seja, utilizou-se da Equação B4.

$$T_{\dot{m}_{29}} = T_{\dot{m}_{28}} * \left(\frac{P_{\dot{m}_{29}}}{P_{\dot{m}_{28}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (\text{B4})$$

A temperatura para a corrente \dot{m}_{29} foi de 679,78 K. Além disso, pode-se calcular o trabalho, por meio da Equação B5. A vazão mássica utilizada é a da corrente \dot{m}_{29} , de 146.337,7 kg.d⁻¹, e o cp dos gases de exaustão, de 1,39 kJ.(kg K)⁻¹. Obteve-se um trabalho de -1.296.035,96 W.

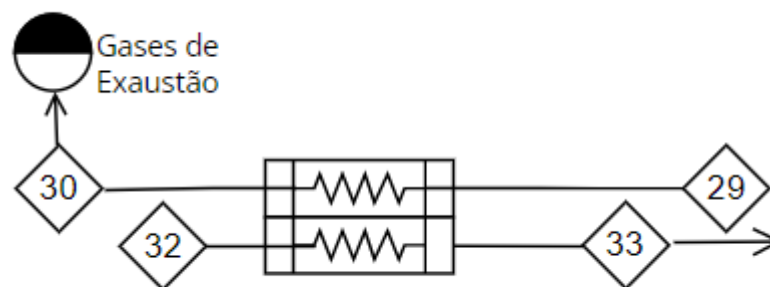
Para descobrir a eficiência do sistema basta dividir o trabalho encontrado pelo calor gerado, como segue a Equação B7, a eficiência calculada foi de 29%.

$$n = \frac{W_{turbina}}{Q_{gerado}} \quad (\text{B7})$$

Para a integração energética, o cálculo para as correntes \dot{m}_{31} e \dot{m}_{32} foram realizados de forma análoga a realizada anteriormente, obtendo-se os mesmos valores. As demais correntes foram calculadas de forma simultânea por meio do software Solver do Excel.

As temperaturas das correntes \dot{m}_{28} e \dot{m}_{29} foram calculadas analogamente ao método anterior, utilizando as equações B3, B4 e B6, inicialmente esses valores são iguais aos obtidos antes de se aplicar a integração. Posteriormente, assumiu-se o volume de controle presente na Figura B15.

Figura B 15 - Trocador de calor contracorrente



Fonte: Autoria Própria (2022)

Deste volume de controle, tem-se especificados as temperaturas das correntes \dot{m}_{32} e \dot{m}_{29} , além disso, a pressão das correntes \dot{m}_{32} e \dot{m}_{33} são iguais, o mesmo vale para as correntes \dot{m}_{29} e \dot{m}_{30} .

Iniciando os cálculos da integração, obteve-se os calores de ambas as correntes ($\dot{Q}_{\dot{m}_{29}}$ e $\dot{Q}_{\dot{m}_{32}}$), a partir da Equação B3, considerando que a variação de temperatura seja de até 10 K. Para a $\dot{Q}_{\dot{m}_{32}}$, utilizou-se como vazão mássica o valor da corrente \dot{m}_{32} , o cp do ar e variação de temperatura considerada é a temperatura da corrente \dot{m}_{33} , sendo essa a da corrente \dot{m}_{29} subtraindo um valor de 10, e da corrente \dot{m}_{32} . Já para $\dot{Q}_{\dot{m}_{29}}$, a vazão mássica é da corrente \dot{m}_{29} , o cp dos gases de exaustão e a variação de temperatura é das correntes \dot{m}_{29} e \dot{m}_{30} , para a última considera-se a temperatura da corrente \dot{m}_{32} somado a 10 K.

Com os valores dos calores, descobre-se o calor limitante, o $\dot{Q}_{\dot{m}_{32}}$, a partir da Equação B6 calcula-se a variação de temperatura para as correntes \dot{m}_{29} e \dot{m}_{30} , utilizando-se vazão mássica e cp referente a corrente \dot{m}_{29} , encontrou-se um valor de ΔT e assim a temperatura da corrente \dot{m}_{30} . Já a temperatura calculada da \dot{m}_{33} foi subtraindo 10 K da corrente \dot{m}_{29} .

Por fim, calculou-se o trabalho na turbina, pela Equação B5, de forma análoga ao calculado anteriormente.

Após estipular todos esses valores, aplicou-se a ferramenta solver, na qual a função objetivo é a maximização do trabalho, as células variáveis é a temperatura da corrente \dot{m}_{33} e o ar adicionado em excesso afim de diminuir a temperatura de combustão, sendo esse inerte.

Além disso, foi necessário adicionar restrições, como a temperatura da corrente \dot{m}_{33} calculada igual a da célula variável, o valor da temperatura da corrente \dot{m}_{29} devia ser menor ou igual a 1773 K e as variações de temperatura do volume de controle da Figura B15, do lado esquerdo e direito, devem ser maiores ou iguais a 10.

Após o solver ser aplicado, obteve-se os valores de temperatura das correntes \dot{m}_{28} , \dot{m}_{29} , \dot{m}_{30} e \dot{m}_{33} , obteve-se o valor do trabalho, pode-se calcular o valor adicionado, por meio da Equação B3 e calcular a eficiência pela Equação B7. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 20.

APÊNDICE C – Cálculos do dimensionamento dos equipamentos

C.1 – Seção 100: Obtenção do Biogás

Para encontrar o volume do biodigestor, utilizou-se a Equação C1, que divide a massa de determinado material por sua densidade.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (C1)$$

Inicialmente transformou-se a corrente 7, equivalente a 765,9 toneladas por mês, para volume. Segundo Silva e Santos (2010), a densidade do material orgânico é igual a 1213 kg.m⁻³. Desta forma, encontrou-se um volume de 631,41 m³.mês⁻¹.

Posteriormente, calculou-se o volume de água necessário, corrente 6, para uma massa de 3036,6 toneladas por mês, com uma densidade de 997 kg.m⁻³, encontrou-se um volume de 3072,82 m³ por mês.

Por fim, encontrou-se o volume de inóculo, corrente 8 que possui um valor de 250 toneladas mensais. De acordo com Moretto *et al.* (2011), a densidade de lodos provenientes de ETE, equivalem a 1000 kg.m⁻³, sendo seu volume de 250 m³.mês⁻¹.

Portanto, o volume final é equivalente a 3954,23 m³, como o reator será batelada e trabalhará por 30 dias, então esse volume é para a produção ao longo do mês e será recebido todo de uma vez.

Além disso, é necessário que esse volume tenha alguma tolerância, sendo essa de 50%. Com o aumento no valor do volume total, tem-se um volume de 6000 m³.

Para manter a temperatura ótima, o reator é encamisado, desta forma, calculou-se a área de troca térmica. Desta forma, as temperaturas do trocador de calor que reveste o biodigestor é inicialmente de 25°C, e a final igual a 32,45°C. Já na biodigestão ocorre uma reação exotérmica, onde tem-se uma temperatura de reação igual a 60°C, de acordo com Tavares *et al.* (2019) a temperatura mínima dentro da faixa de ótima de operação equivale a 20°C.

Para calcular a área de troca térmica usou-se a Equação C2.

$$Q = A * U * \Delta T \quad (C2)$$

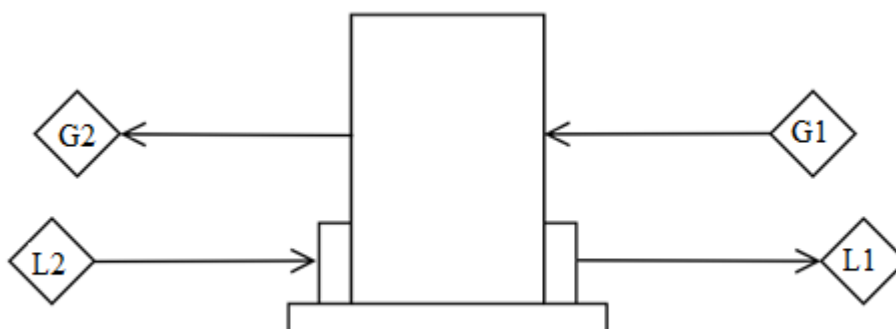
Sendo U , coeficiente global de transferência de calor, equivalente a $50 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \text{ K})^{-1}$. A variação de temperatura é calculada por meio de média logarítmica, dada pela Equação C3.

$$\Delta T = MLDT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (\text{C3})$$

Sendo assim, a região 1 é composta pelas temperaturas de saída e a região 2 é composta pelas temperaturas de entrada, então a ΔT é igual a $21,82^\circ\text{C}$. Do balanço de energia, sabe-se que o calor é igual a $31,1893 \text{ kW}$, logo, substituindo os valores adquiridos na Equação C2 e isolando a área desta, tem-se que a área é $28,6 \text{ m}^2$.

A torre de resfriamento é representada pelo volume de controle da Figura C1.

Figura C 1 - Torre de resfriamento



Fonte: Autoria Própria (2022)

As correntes L_1 e L_2 representam a água pós e antes do resfriamento, respectivamente. Já as correntes G_1 e G_2 são o ar de entrada e saída. Os valores de temperatura já conhecidos do sistema estão presentes na Tabela C1.

Tabela C 1 - Temperaturas das correntes da torre de resfriamento

Correntes	Temperatura (°C)
G ₁	25
L ₁	25
L ₂	32,45

Fonte: Autoria Própria (2022)

Além disso, adotou-se que o sistema trabalha à pressão atmosférica, 1 atm, o fluxo de ar seco e da corrente de água equivale a $1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, também estipulou-se que a temperatura de bulbo úmido (T_{bu}) do ar equivale a 23°C.

Com esses dados, por meio do gráfico psicrométrico, foi possível encontrar a entalpia, sendo essa de $66 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ de ar seco. Segundo Geankoplis (1993), o coeficiente volumétrico global médio de transferência de massa, kG_a, é de $1,207 \cdot 10^{-7} \text{ kmol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$.

Também realizou-se a consideração de: $L_2 \cong L_1 \cong L$, o cp utilizado para a água foi de $4,187 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ e a massa molar do ar (MM_{ar}) de $29 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$.

Proveniente do site CheCalc, obteve-se a razão de umidade do ar de entrada (w₁) de 0,0154 kg de vapor por kg de ar seco. Desta forma, foi possível calcular a entalpia do gás de entrada, por meio da Equação C4.

$$H_{y1} = (1,005 + 1,88w_1)TG_1 + 2501,4w_1 \quad (\text{C4})$$

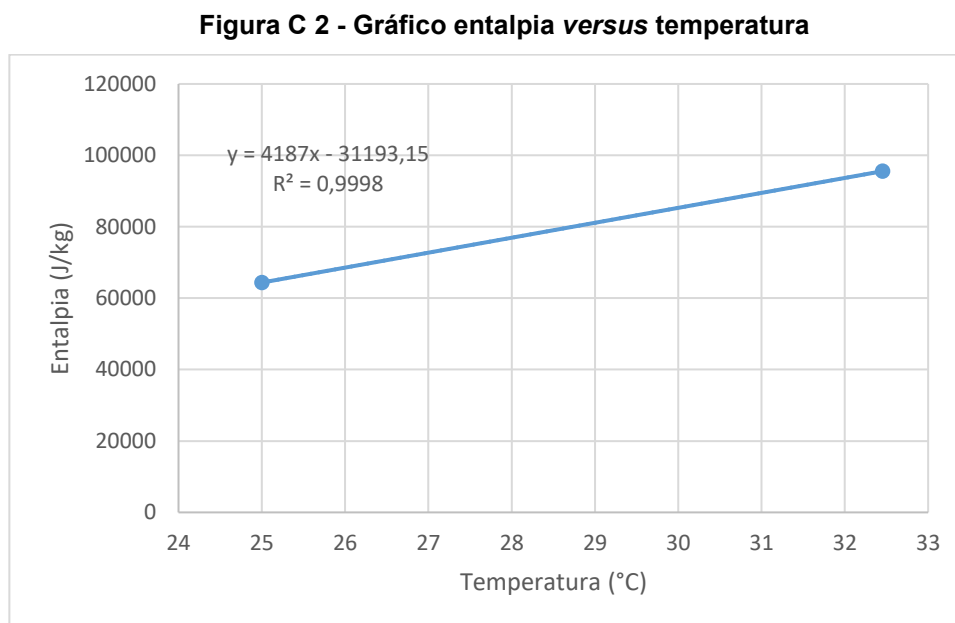
Substituindo a temperatura de G₁ e w₁, encontrou-se o valor para H_{y1} de $64370,36 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Assim, falta encontrar a entalpia para G₂, então assumiu-se que o ponto 1 será referente a temperatura e entalpia de L₁ e G₁, respectivamente, e de forma análoga ao ponto 2, que será em relação a L₂ e G₂.

Realizou-se, então, um balanço de energia para encontrar a entalpia da corrente G₂, a partir da Equação C5.

$$G(H_{y2} - H_{y1}) = L * cp(TL_2 - TL_1) \quad (\text{C5})$$

Sendo os fluxos G e L equivalentes a $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$, além de conhecer os demais valores, obteve-se uma H_{y2} de $95563,51 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Definindo a Equação C5 como a equação da linha de operação, assumindo que H_y representa o eixo y e TL o eixo x, pode-se plotar o gráfico entalpia *versus* temperatura presente na Figura C2.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para encontrar a altura da torre de resfriamento, utilizou-se a Equação C6.

$$Z = \frac{G}{MM_{ar} * kGa * P} \int_{Hy1}^{Hy2} \frac{dHy}{Hyi - Hy} \quad (C6)$$

A Equação C6 pode ser dividida em duas, sendo representadas por C7 e C8.

$$HTU = \frac{G}{MM_{ar} * kGa * P} \quad (C7)$$

$$NTU = \int_{Hy1}^{Hy2} \frac{dHy}{Hyi - Hy} \quad (C8)$$

Resolvendo primeiramente a Equação C7, sendo todos os valores desta conhecidos, chega-se no valor de HTU igual a $2,82 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-2}$. Posteriormente, resolveu-se a integral presente na Equação C8, na qual já se tem a Equação Hy como

a equação da reta do Gráfico da Figura 61, a partir dessa, pode-se estabelecer a Equação H_{yi} , sendo essa a C9.

$$H_{yi} = -41870(T_{Li} - TL) + H_y \quad (C9)$$

Desta forma, resolveu-se a Equação C9, substituindo os possíveis valores de temperatura para correntes L, somado a sua respectiva entalpia, sendo possível montar a Tabela C2, que possui os valores do sistema.

Tabela C 2 - Valores encontrados para resolução da integral

Ponto	H_{yi}	H_y	$(H_{yi} - H_y)$	$\frac{1}{(H_{yi} - H_y)}$
A	77350,06	64370,36	12979,7	$7,704 \cdot 10^{-5}$
B	110804,19	95563,51	15240,60	$6,561 \cdot 10^{-5}$
C	103628,25	88504,65	15123,6	$6,612 \cdot 10^{-5}$
D	110804,19	94563,51	16240,68	$6,157 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Autoria Própria (2022)

Resolvendo a integral da Equação C8, tem-se um valor de NTU igual a 2,150 $m^3s^2.kg^{-1}$. Realizando a multiplicação de HTU e NTU , a altura obtida é de 6,0 m.

Para encontrar o volume do gasômetro da seção de obtenção de biogás utilizou-se a Equação C1. Desta forma, a quantidade de biogás produzido, corrente \dot{q} , equivale a 17.093,61 $kg.d^{-1}$. De acordo com Zank *et al.* (2020), a densidade do biogás é de 1,2039 $kg.m^{-3}$. Portanto, o volume desse é igual a 14200 $m^3.d^{-1}$.

C.2 – Seção 200: Purificação do Biogás

Os primeiros equipamentos a necessitarem da realização de cálculos para o dimensionamento são os trocadores de calor. Como explicado anteriormente, para encontrar o trocador ideal para o presente processo é necessário o cálculo da área de troca térmica e da vazão de utilidade requerida. De acordo com Welty (2017), o dimensionamento de trocadores de calor pode ser realizado por duas metodologias: pela Média Logarítmica da Diferença das Temperaturas (MLDT) ou pelo Número de

Unidades de Transferência (NUT). Neste trabalho será utilizada a abordagem do método MLDT, sendo que seu equacionamento está descrito na Equação C10

$$Q = U * A * MLDT \quad (C10)$$

Onde U é o coeficiente global de troca térmica, A é a área e $MLDT$ é o cálculo da Média Logarítmica da Diferença das Temperaturas, expressa pela Equação C11

$$MLDT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (C11)$$

Com base nisto, inicia-se esta abordagem pelo TC-201. Tal equipamento tem a função de resfriar o biogás comprimido (14) à temperatura de 25°C, tendo como utilidade a água. Assim, sabe-se do balanço energético do sistema de compressão que o fluido quente – biogás – entra nesse trocador a 232,24 °C e deve sair a 25 °C. Para a água, considera-se a temperatura de entrada de 18°C, estipulando uma vazão mássica de 18.000,00 kg.d⁻¹. Por meio do *software* de simulação COCO, encontrou-se a temperatura de saída da utilidade, sendo de 98,40 °C, em fase líquida.

Em posse de todas as temperaturas, aplicando-as na Equação C3 e considerando um escoamento em contracorrente, tem-se um $MLDT$ de 133,87 °C, como demonstrado nos cálculos abaixo.

$$MLDT = \frac{(232,24 - 25) - (98,40 - 18)}{\ln\left(\frac{(232,24 - 25)}{(98,40 - 18)}\right)} = 133,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por fim, com o valor do MLDT, pode-se calcular a área de troca térmica por meio da Equação C2, considerando o calor calculado no balanço de energia de 75.810,61 W e a aproximação para o valor de U de 150 W.m⁻².°C⁻¹ (WELTY, 2017).

$$A = \frac{Q}{U * MLDT} = \frac{75.810,61}{150 * 133,87} = 3,78 \text{ m}^2$$

Para o TC-202, deve-se realizar o aquecimento da corrente de solvente Selexol® com os gases de impurezas (20) de 90 a 100°C, por meio da utilização de vapor saturado. Assim, assume-se que a temperatura de entrada do vapor é de 110°C e que o mesmo sai como líquido saturado na mesma temperatura. Com esta consideração, pode-se encontrar a vazão de vapor saturado necessária para este aquecimento, por meio da Equação C12 a seguir.

$$Q = \dot{m} * \lambda \quad (C12)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica de vapor e λ o calor latente de vaporização da água.

Para este processo, utilizou-se 2230,2 kJ.kg⁻¹ para o calor de vaporização, de acordo com a tabela A-2 de Moran (2018). Assim, com estes dados e o calor calculado no balanço energético (428.415,28 W), encontrou-se uma vazão mássica de vapor de 16.597,20 kg.d⁻¹. Além disso, calculou-se de forma análoga ao TC-201 o *MLDT* – apresentado na Equação C3 – obtendo o valor de 9,10 °C. Sendo assim, ao aplicar a Equação C2, utilizando o valor do coeficiente global de troca térmica de 170 W.m⁻².°C⁻¹, obteve-se a área de 276,86 m² (WELTY, 2017).

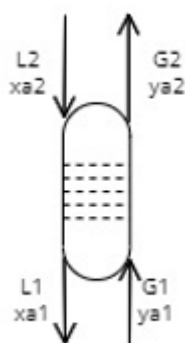
De forma semelhante deve-se seguir para o TC-203, o qual é responsável pelo resfriamento da corrente de solvente (24) de 35 a 25°C, sendo que a utilidade escolhida para tal foi a água a 18°C. Com a finalidade de que a primeira lei da termodinâmica seja respeitada, considerou-se que a maior temperatura que a água poderia sair, seria de 25°C. Em posse das temperaturas de todas as correntes, calculou-se o *MLDT* pela Equação C11, obtendo o valor de 8,41 °C. Além disso, com o calor calculado pelo balanço energético (417.949,10 W) e considerando U como 170 W.m⁻².°C⁻¹, calculou-se a área de 292,30 m². Por fim, quantificou-se a vazão mássica de água necessária através da Equação B3, considerando Q como sendo o calor citado acima, o c_p de 4,18 kJ.kg⁻¹ e a variação de temperatura de 7°C (MORAN, 2018). Para estas condições, encontrou-se a vazão de 12.341.135,42 kg.d⁻¹.

Para concluir os dimensionamentos dos trocadores térmicos do Setor 200, faz-se necessário determinar a área de troca térmica do Integrador Energético IE-201. Para isto, utilizou-se a Equação C10, considerando Q como sendo o valor do calor trocado nesta integração energética (9070,69 W) e U como 170 W.m⁻².°C⁻¹. Neste caso, não houve a necessidade do cálculo do *MLDT*, pois como visto na Diagrama de

Temperatura *versus* Entalpia, a variação de temperatura é uma constante de 10°C. Sendo assim, a área obtida foi de 5,34 m².

Prosseguindo os dimensionamentos do Setor de Purificação, tem-se a seguir os cálculos realizados para a determinação da altura, diâmetro e número de pratos da coluna de absorção de gases. Este volume de controle está expresso na Figura C3, sendo que se mudou a nomenclatura das correntes e frações de acordo a literatura. Para o desenvolvimento dos cálculos, considerou-se que tal coluna seria apenas para a absorção do gás carbônico, dado que no processo é o componente a ser absorvido em maior quantidade e não se tem casos na literatura de cálculo para absorção de mais de um gás simultaneamente, considerando uma eficiência de absorção de 97%.

Figura C 3 – Volume de controle para dimensionamento da coluna de absorção



Fonte: Autoria própria (2022)

A seguir, transformou-se as frações mássicas do gás carbônico encontradas no balanço material para base molar, sabendo que a massa molar do mesmo é de 44 g.mol⁻¹. Estas frações estão dispostas na Tabela C3.

Tabela C 3 – Transformação de base mássica para molar das frações do CO₂

	xa1	xa2	ya1	ya2
Fração mássica	0,0036	0	0,38	0,03
Fração molar	0,022	0	0,19	0,011

Fonte: Autoria própria (2022)

Além disso, realizou-se a mesma mudança de base para as vazões de entrada L2 e G1, as quais apresentaram o valor de 1.752.951,57 e 776,64 kmol.d⁻¹, respectivamente. Em posse destes valores, pode-se calcular as razões molares,

parâmetros estes expressos em termos de unidades de concentração sem soluto, as quais podem ser encontradas pelo cálculo expresso na Equação C13 (WELTY, 2017).

$$Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A} \quad (C13)$$

Através da aplicação da equação C13 nas frações molares, encontrou-se as razões apresentadas na Tabela C4.

Tabela C 4 – Razões molares

X_{A1}	0,023
X_{A2}	0,000
Y_{A1}	0,240
Y_{A2}	0,011

Fonte: Autoria própria (2022)

A seguir, precisa-se elaborar a curva de equilíbrio desta operação de absorção. Para isso, utilizou-se a Lei de Henry - expressa pela Equação C14 - que relaciona a pressão do sistema (P), a constante de Henry a 25°C (H) e as frações molares do soluto na fase líquida (X_i) e gasosa (Y_i) (GREEN, 2008).

$$Y_i * P = H * X_i \quad (C14)$$

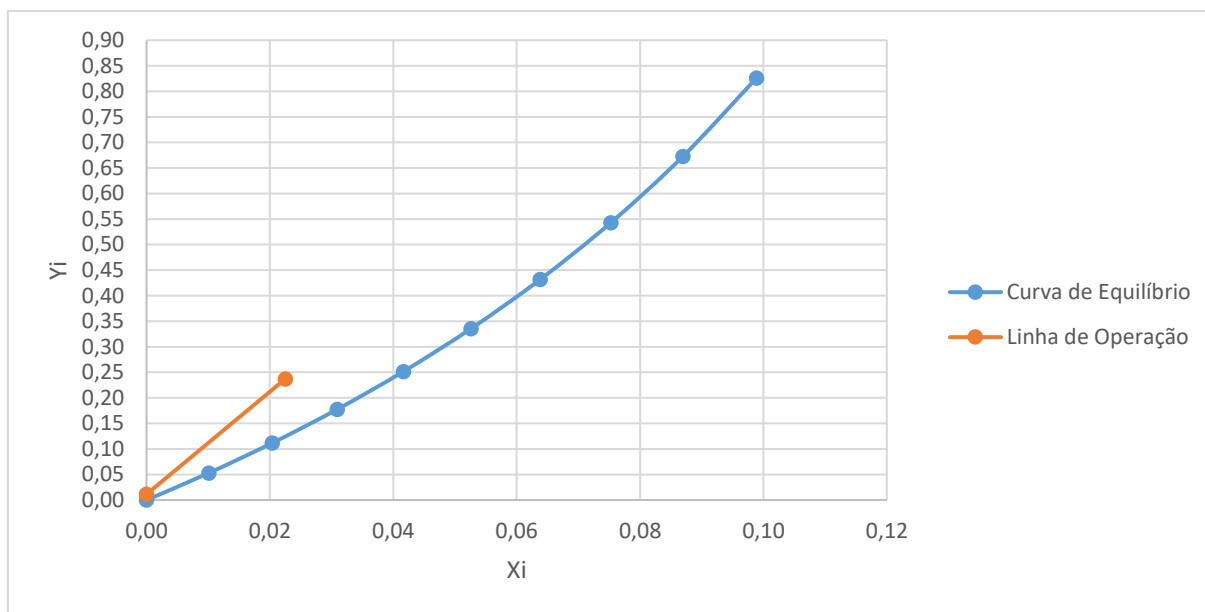
Como a absorção estudada se trata de gás carbônico em Selexol®, tem-se que de acordo com Rabridan (2012), a constante de Henry para 25°C é de 34,74 atm. Além disso, sabe-se a pressão de operação da coluna, de 6,91 atm. Com estes dados e, variando as frações molares na fase líquida, consegue-se encontrar as frações molares de soluto na fase gasosa. Com estas frações, aplica-se a Equação C13, a fim de se obter as razões molares no equilíbrio. A Tabela C5 apresenta as razões molares calculadas.

Tabela C 5 – Razões molares de CO_2 no equilíbrio, a 25°C

X_i	Y_i
0,00	0,00
0,01	0,05
0,02	0,11
0,03	0,18
0,04	0,25
0,05	0,34
0,06	0,43
0,08	0,54
0,09	0,67
0,10	0,83
0,00	0,00
0,01	0,05
0,02	0,11
0,03	0,18
0,04	0,25
0,05	0,34
0,06	0,43
0,08	0,54
0,09	0,67
0,10	0,83

Fonte: Autoria própria (2022)

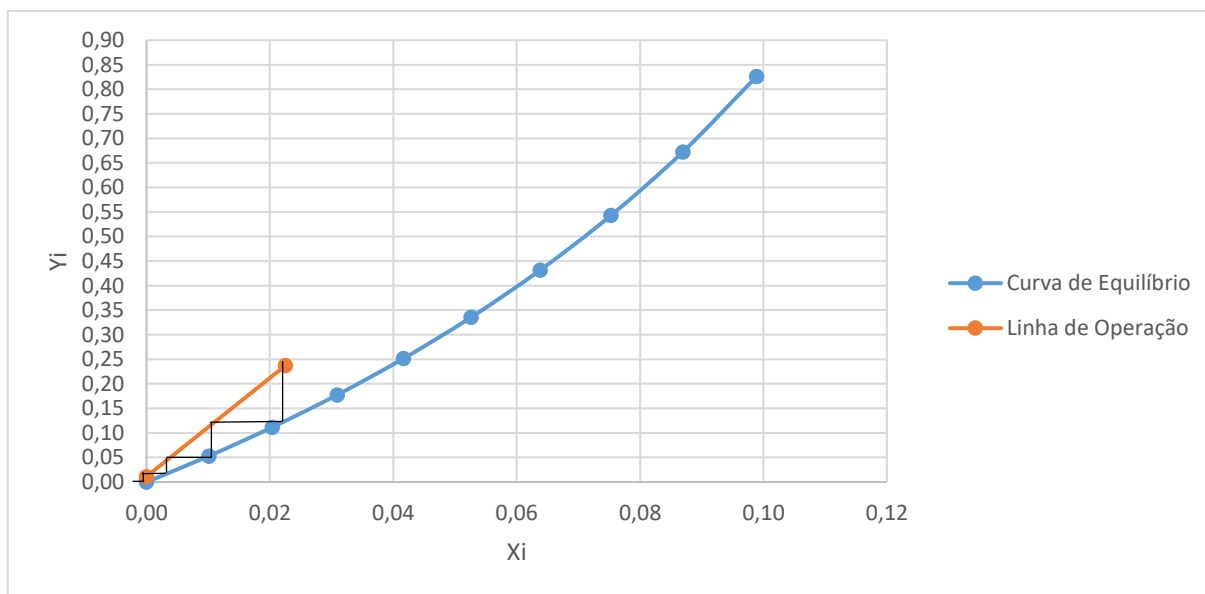
Em posse das razões molares referentes ao processo e das razões encontradas no equilíbrio, plota-se o gráfico representado pela Figura C4, o qual apresenta a linha de operação do processo, bem como a curva de equilíbrio.

Figura C 4 – Gráfico da linha de operação e curva de equilíbrio, a 25°C

Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando a figura acima, confirma-se a coerência deste processo de absorção, dado que a linha de operação do processo se posiciona acima da curva de equilíbrio. Além disso, por meio da aplicação da metodologia de McCabe-Thiele, pode-se encontrar o número de pratos necessários para a realização desta operação de absorção de gases. A Figura C5 explicita a aplicação desta metodologia, a qual resultou em um total de 4 pratos.

Figura C 5 – Aplicação da metodologia de McCabe-Thiele



Fonte: Autoria própria (2022)

A determinação da altura desta coluna se baseou pelo espaçamento entre os pratos. De acordo com Spellman e Whiting (2004), o espaçamento comum é entre 45 e 70 cm, sendo que para o presente trabalho adotou-se 61 cm. Desta forma, a altura encontrada é de 2,5 m. Além disso, para a determinação do diâmetro utilizou-se a correlação representada pela Equação C15.

$$d = \Psi * (Q(P_g)^{0,5})^{0,5} \quad (C15)$$

Onde d é o diâmetro da coluna (m), Q é a vazão volumétrica de biogás ($m^3 \cdot h^{-1}$), P_g é a densidade do biogás ($kg \cdot m^{-3}$) e Ψ é o resultado de uma correlação empírica cujo valor é de 0,0014 (SPELLMAN; WHITING, 2004). Para obter a densidade do biogás, é necessário realizar a média ponderada de seus componentes, de acordo com suas respectivas densidades. Após a realização destes cálculos, se tem uma densidade de $1,17 \text{ kg} \cdot m^{-3}$. Aplicando-se a Equação C15 com os dados descritos, considerando um fator de segurança de 50%, tem-se um diâmetro de 1 m.

Por fim, deve-se realizar o dimensionamento do Lavador Venturi, equipamento este utilizado no tratamento da corrente de gases de exaustão oriunda do processo de purificação do biogás. Para escolher o lavador que melhor se adequa no processo, é necessário calcular o volume da corrente gasosa a ser tratada. Sendo assim, utilizando os dados obtidos no balanço material do Vaso Regenerador, e as

densidades de 1,833, 1,539, 0,5963 kg.m⁻³ para o CO₂, H₂S e NH₃, respectivamente, obteve-se um volume de 285,13 m³.h⁻¹. Em posse desta vazão volumétrica, pôde-se escolher o equipamento que melhor se adequa no processo.

Outro cálculo necessário a ser realizado para o controle de custos do processo, é a quantidade de solução de NaOH 0,05 M utilizada para tratar os gases carbônico e sulfídrico. Para isso, transformou-se para base molar as vazões dos mesmos, obtendo-se os valores de 2,97 kmol.h⁻¹ e 5,99 kmol.h⁻¹ para o gás sulfídrico e carbônico, respectivamente. Assim, por meio da estequiometria das reações expressas pelas Equações 6 e 7, calculou-se uma vazão molar de 4.046,16 kmol.h⁻¹. Dado que a solução de hidróxido de sódio é de 0,05 mol.L⁻¹, calculou-se que o volume necessário da mesma seria de 358,70 m³.h⁻¹.

C.3 – Seção 300: Geração de Energia Elétrica

Os cálculos realizados nessa seção foi para obter a área do regenerador da geração de energia elétrica, esse é proveniente da integração energética. Sendo assim, utilizou-se novamente as Equações C2 e C3.

O coeficiente global de transferência de calor para esse caso é de 250 W.m⁻² K⁻¹ (ESSEL, 2020). O calor disponível e limitante para esse volume de controle, disponível na Tabela 20, é equivalente a 456,2 kW. As temperaturas utilizadas também estão dispostas na Tabela 20, sendo essas das correntes 32 e 33, corrente fria, 29 e 30 como a corrente quente.

Encontrando a variação das temperaturas por meio de MLDT, tem-se:

$$MLDT = \frac{(640,30 - 543,43) - (835,48 - 825,48)}{\ln \left(\frac{640,30 - 543,43}{835,48 - 825,48} \right)} = 38,26 K$$

Aplicando os valores obtidos na Equação C2, de forma que se isolou a área, chegando a um valor de 47,7m² para a área de troca térmica.

C.4 – Seção 400: Obtenção do biofertilizante

Para encontrar as vazões dos equipamentos dessa seção, inicialmente calculou-se as densidades dos principais componentes de um fertilizante, sendo eles o nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P). Assumiu-se a pressão de 1,01325 bar, desta forma, as densidades para N, P e K são de 808,607 kg.m⁻³ (NITROTEC, 2021), 1.800 kg.m⁻³ (LUZ, 2019) e 862 kg.m⁻³ (LUZ, 2019), respectivamente. Então realizou-se a densidade média, obtendo-se um valor de 1.156,87 kg.m⁻³.

O primeiro processo realizado para obter o biofertilizante, é encaminhar o digestato para uma peneira, retirando o restante do material inorgânico. Para relacionar a vazão da corrente 10, de 3566,7 ton.mês⁻¹, com a vazão do equipamento encontrado, transformou-se a unidade para L.h⁻¹, assim como se segue:

$$3566,7 \frac{t}{mês} * 1000 \frac{kg}{t} * \frac{1 \text{ mês}}{30 \text{ dias}} * \frac{1 \text{ dia}}{1 \text{ hora}} * \frac{m^3}{1.156,87 \text{ kg}} * \frac{1000L}{m^3} = 4.282,03 \text{ L. h}^{-1}$$

Posteriormente, transformou-se também a vazão da corrente 35, equivalente a 3477,5 ton.mês⁻¹. Porém a unidade necessária era em m³.h⁻¹, obtendo-se:

$$3477,5 \frac{t}{mês} * 1000 \frac{kg}{t} * \frac{1 \text{ mês}}{30 \text{ dias}} * \frac{1 \text{ dia}}{1 \text{ hora}} * \frac{m^3}{1.156,87 \text{ kg}} = 4,17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

A fim de se encontrar o filtro que se adeque ao processo, necessitou-se determinar a vazão volumétrica da corrente de lama espessada (36) oriunda do decantador, a qual é composta por uma fração de matéria orgânica seca e uma fração líquida. Tais valores estão descritos nos balanços materiais dos volumes de controle, referentes ao processo de obtenção do biofertilizante. Desta forma, em posse da vazão mássica da corrente (1.352,36 kg.h⁻¹), da fração mássica seca (0,715) e líquida (0,285), além da densidade média já encontrada anteriormente (1.156 kg.m⁻³), pode-se encontrar a vazão volumétrica total.

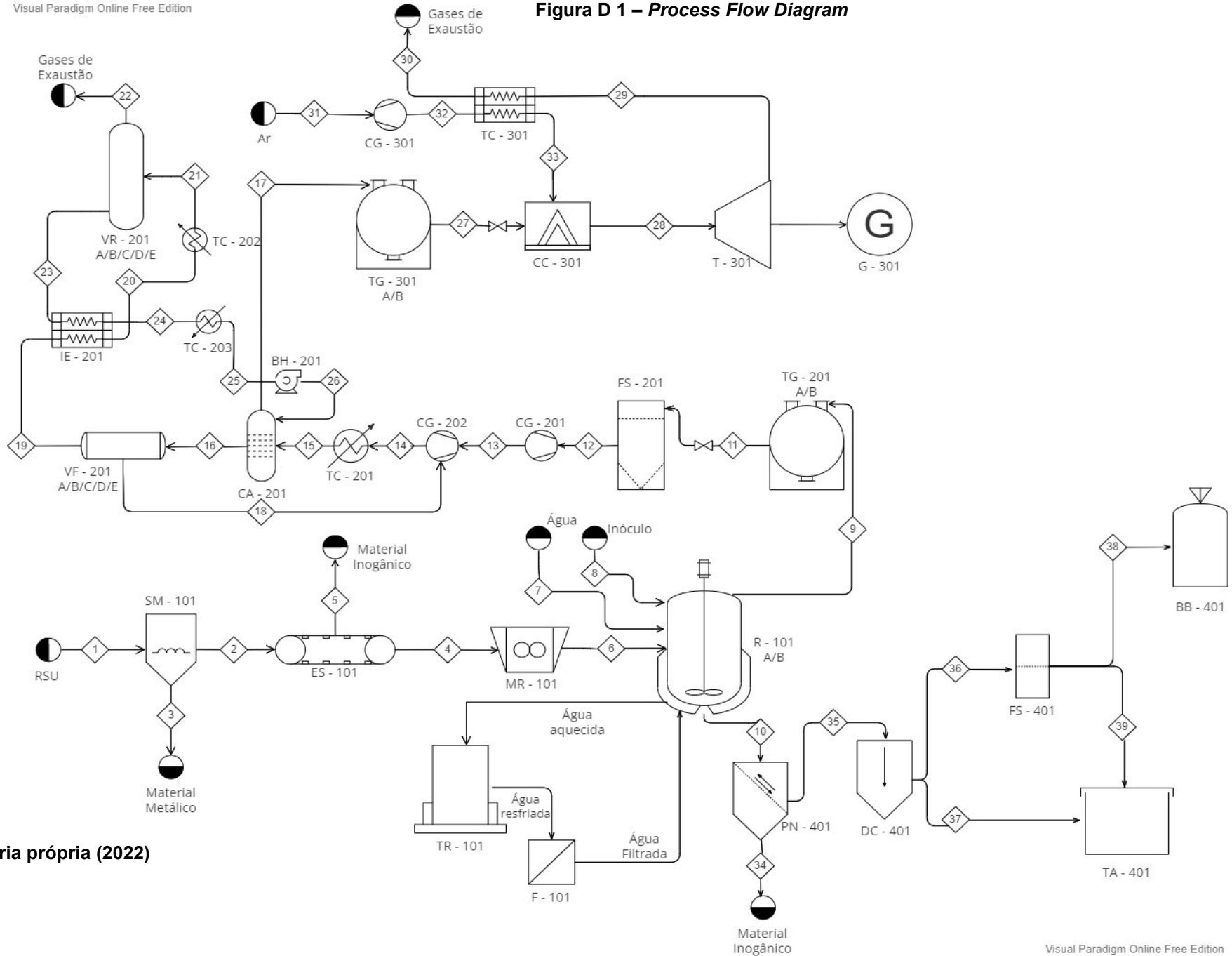
Para isso, dividiu-se a vazão mássica de cada tipo de biofertilizante pela densidade média, encontrando-se os valores de vazão volumétrica de 0,84 e 0,33 m³.h⁻¹ para os fertilizantes sólido e líquido, respectivamente. Por fim, somou-se estes dois valores, obtendo a vazão resultante de 1,17 m³.h⁻¹ de biofertilizante. Por meio

deste dado, se faz possível a escolha do filtro que se adequa ao processo descrito no presente trabalho.

A fim de dimensionar os tanques de armazenamentos TA-401 e TA-402, utilizou-se o dado de densidade média calculado acima ($1.156,87 \text{ kg.m}^{-3}$) e as vazões mássicas de cada tipo de biofertilizante, oriundas dos balanços materiais, para determinar a vazão volumétrica de fertilizante. Dado que a vazão total de biofertilizante líquido é de $2.782 \text{ ton.mês}^{-1}$ e de sólido de $695,5 \text{ ton.mês}^{-1}$, encontrou-se que as vazões volumétricas são de $2404,76$ e $601,20 \text{ m}^3.\text{mês}^{-1}$, para o líquido e sólido, respectivamente.

APÊNDICE D – *Process Flow Diagram* (PFD)

Figura D 1 – Process Flow Diagram



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela D 1 – Características das correntes enumeradas de 1 a 13 no PFD

Número da Corrente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	175,44
Pressão (bar)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela D 2 – Características das correntes enumeradas de 14 a 26 no PFD

Número da Corrente	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Temperatura (°C)	232,24	25	25	25	25	25	90	100	100	100	35	25	25
Pressão (bar)	7	7	7	7	4	4	4	4	1	1	1	1	7

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela D 3 – Características das correntes enumeradas de 27 a 39 no PFD

Número da Corrente	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Temperatura (°C)	25	1240,44	562,48	367,3	27	270,43	552,48	25	25	25	25	25	25
Pressão (bar)	1	8,1	1	7	1	8,1	8,1	1	1	8,1	8,1	1	1

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela D 4 – Descrição dos equipamentos presentes no PFD

Sigla	Descrição	Sigla	Descrição
SM-101	Separador Magnético	VF-201	Vaso <i>Flash</i>
ES-101	Esteira de Separação	VR-201	Vaso Regenerador
MR-101	Moinho de Rolos	BH-201	Bomba Hidráulica
R-101	Reator Biológico	TG-201	Tanque de Gás Purificado
TR-101	Torre de Resfriamento	CC-301	Câmara de Combustão
F-101	Sistema de Filtração	T-301	Turbina
TG-201	Tanque de Gás	TC-301	Trocador de Calor
FS-201	Filtro Separador	CG-301	Compressor de Gás
CG-201	1º Compressor de Gás – purificação	G-301	Gerador de Energia
CG-202	2º Compressor de Gás – purificação	PN-401	Peneira
TC-201	1º Trocador de Calor – purificação	DC-401	Decantador
TC-202	2º Trocador de Calor – purificação	FS-401	Filtro Separador
CA-201	Coluna de Absorção	TA-401	Tanque de Armazenamento
IE-201	Integrador Energético	BB-401	<i>Big Bags</i> de Armazenamento

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela D 5 – Dimensões dos equipamentos representados no PFD

Setor 100	SM-101 L: 500 mm B: 550 mm H: 60 mm O: 500 mm	R-101 Volume: 3.000 m ³	Setor 200	FS-201 A: 1200 mm B: 500 mm C: 200 mm D: 250 mm E: 100 mm	IE-201 A: 5,34 m ²	Setor 300	T-301 Altura: 3,3 m Largura: 3,3 m Comprimento: 9,1 m	Setor 400	PN-401 Abertura: 100 μ m Diâmetro: 600 mm
	ES-101 Comprimento: 20 m	TR-101 Altura: 6,0 m		CG-201 e CG-202 Vazão Máxima: 1290 m ³ .h ⁻¹ Queda de pressão máxima: 3,5 bar	VF-201 A/B/C/D/E Altura: 157,48 cm Diâmetro: 50,8 cm		G-301 Potência máxima: 180 MVA		DC-401 Altura: 3,7 m Largura: 1,05 m Comprimento: 1,2 m
	MR-101 Altura: 1,8 m Largura: 2,07 m Comprimento: 2,39 m Diâmetro cilindro: 0,5 m			TC-201 A: 3,78 m ² Vazão utilidade: 18.000 kg.d ⁻¹	BH-201 Diâmetro: 28 mm Pressão máxima: 15 bar		TC-301 Área: 47,7 m ²		FS-401 Altura: 2000 mm Largura: 600 mm Comprimento: 1300 mm
	F-101 Altura: 1,5 m Largura: 0,65 m Altura Cilíndrica: 1 m Diâmetro: 0,5 m			TC-202 Área: 276,86 m ² Vazão utilidade: 16.597,20 kg.d ⁻¹	CA-201 Altura: 2,5 m Diâmetro: 1 m Número de Pratos: 4				TA-401 Volume: 1.500 m ³
	TG-101 A/B V: 10000 m ³ Diâmetro: 15 m			TC-203 Área: 494,61 m ² Vazão utilidade: 4.319.473,86 kg.d ⁻¹	TG-201 A/B Volume: 6.152 m ³ Diâmetro: 12,4 m				BB-401 Peso máximo: 2 toneladas

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela D 6 – Características das correntes de utilidades representadas no PFD

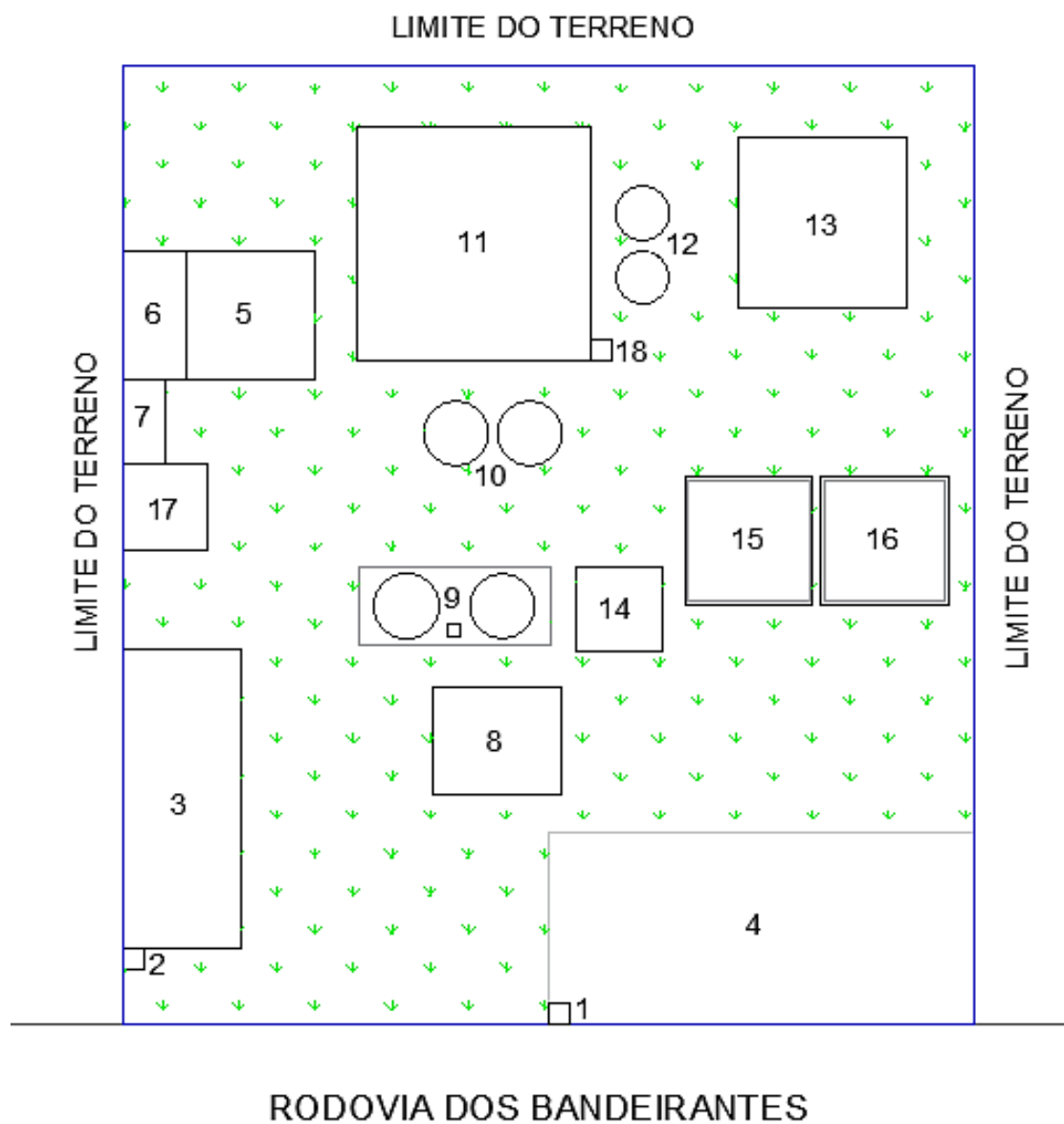
Utilidade	Água aquecida	Água resfriada	Água filtrada
Temperatura (°C)	32,45	25	25
Pressão (bar)	1	1	1

Fonte: Autoria própria (2022)

APÊNDICE E – *Layout*

O layout da Indústria BioG está representado na Figura E1 e a identificação de suas numerações estão descritas na Tabela E1, juntamente com as respectivas áreas.

Figura E 1 - Layout da Indústria BioG



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela E 1 - Identificação dos locais do *layout*

Identificação	Nome	Área (m ²)
1	Guarita de caminhões	25
2	Guarita público geral	25
3	Estacionamento	1960
4	Área de circulação de caminhões	4510
5	Administrativo	900
6	Refeitório	450
7	Almoxarifado	200
8	Recebimento matéria-prima	500
9	Biodigestores	354
10	Gasômetros pré purificação	354
11	Purificação do biogás	3025
12	Gasômetros pós purificação	242
13	Geração de energia elétrica	1600
14	Tratamento do digestato	400
15	Tanque de armazenamento	900
16	<i>Big Bags</i> de Armazenamento	900
17	Laboratório de qualidade	400
18	Caldeira	25

Fonte: Autoria própria (2022)

APÊNDICE F – Análise financeira

F.1 – Custos fixos

Tabela F1 - Preço dos equipamentos

Equipamentos	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
Peneira rotativa	1	R\$ 390.000,00	R\$ 390.000,00
Separador Magnético	1	R\$ 3.500,00	R\$ 3.500,00
Esteira de separação	1	R\$ 75.000,00	R\$ 75.000,00
Moinho de rolos	1	R\$ 279.560,00	R\$ 279.560,00
Biodigestor	2	R\$ 6.000.000,00	R\$ 12.000.000,00
Torre de resfriamento	1	R\$ 250.000,00	R\$ 250.000,00
Sistema de filtração de água	1	R\$ 40.635,00	R\$ 40.635,00
Gasômetro 1	2	R\$ 545.873,00	R\$ 1.091.746,00
Filtro Manga	1	R\$ 8.900,00	R\$ 8.900,00
Compressores	2	R\$ 189.917,50	R\$ 379.835,00
Trocadores de Calor 1	1	R\$ 274.429,33	R\$ 274.429,33
Trocadores de Calor 2	1	R\$ 686.310,40	R\$ 686.310,40
Trocadores de Calor 3	1	R\$ 688.894,40	R\$ 688.894,40
Trocadores de Calor 4	1	R\$ 404.654,40	R\$ 404.654,40
Coluna de absorção	1	R\$ 1.850.000,00	R\$ 1.850.000,00
Vaso Flah	5	R\$ 96.340,00	R\$ 481.700,00
Vaso Regenerador/ Flash	5	R\$ 96.340,00	R\$ 481.700,00
Bomba Hidráulica	1	R\$ 37.455,00	R\$ 37.455,00
Gasômetro 2	2	R\$ 423.824,45	R\$ 847.648,90
Caldeira	1	R\$ 332.600,00	R\$ 332.600,00
Lavador Venturi	1	R\$ 75.850,00	R\$ 75.850,00
Turbina a gás	1	R\$ 1.262.943,00	R\$ 1.262.943,00
Gerador	1	R\$ 1.545.939,00	R\$ 1.545.939,00
Trocador de calor 5	1	R\$ 149.174,28	R\$ 149.174,28
Peneira rotativa	1	R\$ 218.000,00	R\$ 218.000,00
Decantador	1	R\$ 110.000,00	R\$ 110.000,00
Filtro Separador	1	R\$ 10.576,60	R\$ 10.576,60
Big Bag	348	R\$ 95,00	R\$ 33.060,00
Tanque de armazenamento	2	R\$ 106.429,44	R\$ 212.858,88
Analisador de gás	1	R\$ 105.367,00	R\$ 105.367,00
Total			R\$ 24.328.337,19

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela F2 - Preço dos veículos

Veículos	Quantidade	Preço unitário	Preço total
Carro	4	R\$ 95.999,00	R\$ 383.996,00
Caminhão	5	R\$ 350.000,00	R\$ 2.450.000,00
Empilhadeira	2	R\$ 110.000,00	R\$ 220.000,00
Total			R\$ 2.353.996,00

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela F3 - Equipamentos do escritório

Equipamento	Quantidade	Preço unitário	Preço total
Computadores	40	R\$ 5474,00	R\$ 218.960,00
Cadeiras	40	R\$ 177,90	R\$ 7.116,00
Mesa de escritório	6	R\$ 3.150,00	R\$ 18.900,00
Impressora	3	R\$ 3.860,00	R\$ 11.580,00
Armário	8	R\$ 582,00	R\$ 4.656,00
Internet	1		R\$ 2.158,00
Total			R\$ 263.370,00

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela F439 - Folha de pagamentos anual

Cargo	Quantidade	Salário (R\$)	Férias (R\$)	13º Salário (R\$)	FGTS (R\$)	Total
Presidente	1	R\$ 249.072,00	R\$ 27.605,48	R\$ 20.756,00	R\$ 19.925,76	R\$ 317.359,24
Dir. Administrativo	1	R\$ 126.252,12	R\$ 13.992,94	R\$ 10.521,01	R\$ 10.100,17	R\$ 160.866,24
Dir. Comercial	1	R\$ 121.728,00	R\$ 13.491,52	R\$ 10.144,00	R\$ 9.738,24	R\$ 155.101,76
Dir. Produção	1	R\$ 140.332,32	R\$ 15.553,50	R\$ 11.694,36	R\$ 11.226,59	R\$ 178.806,76
Gerente de RH	1	R\$ 92.642,40	R\$ 10.267,87	R\$ 7.720,20	R\$ 7.411,39	R\$ 118.041,86
Gerente de Vendas	1	R\$ 59.428,80	R\$ 6.586,69	R\$ 4.952,40	R\$ 4.754,30	R\$ 75.722,20
Gerente de Qualidade	1	R\$ 38.930,04	R\$ 4.314,75	R\$ 3.244,17	R\$ 3.114,40	R\$ 49.603,36
Gerente de controle	1	R\$ 120.192,00	R\$ 13.321,28	R\$ 10.016,00	R\$ 9.615,36	R\$ 153.144,64
Gerente de produção	1	R\$ 55.464,00	R\$ 6.147,26	R\$ 4.622,00	R\$ 4.437,12	R\$ 70.670,38

Gerente de Contratos	1	R\$ 139.608,00	R\$ 15.473,22	R\$ 11.634,00	R\$ 11.168,64	R\$ 177.883,86
Gerente de Marketing	1	R\$ 85.620,00	R\$ 9.489,55	R\$ 7.135,00	R\$ 6.849,60	R\$ 109.094,15
Gerente de Manutenção	1	R\$ 139.608,00	R\$ 15.473,22	R\$ 11.634,00	R\$ 11.168,64	R\$ 177.883,86
Gerente Financeiro	1	R\$ 49.368,00	R\$ 5.471,62	R\$ 4.114,00	R\$ 3.949,44	R\$ 62.903,06
Técnico em Laboratório	2	R\$ 22.884,00	R\$ 2.536,31	R\$ 1.907,00	R\$ 1.830,72	R\$ 58.316,06
Engenheiro Químico	2	R\$ 87.264,00	R\$ 9.671,76	R\$ 7.272,00	R\$ 6.981,12	R\$ 222.377,76
Engenheiro de Seg. do Trab.	1	R\$ 87.264,00	R\$ 9.671,76	R\$ 7.272,00	R\$ 6.981,12	R\$ 111.188,88
Analista financeiro	3	R\$ 56.375,64	R\$ 6.248,30	R\$ 4.697,97	R\$ 4.510,05	R\$ 215.495,88

Analista de Manutenção	3	R\$ 43.368,00	R\$ 4.806,62	R\$ 3.614,00	R\$ 3.469,44	R\$ 165.774,18
Analista de produção	6	R\$ 40.850,88	R\$ 4.527,64	R\$ 3.404,24	R\$ 3.268,07	R\$ 312.304,98
Auxiliar Adm.	15	R\$ 19.041,60	R\$ 2.110,44	R\$ 1.586,80	R\$ 1.523,33	R\$ 363.932,58
Auxiliar de produção	30	R\$ 16.488,00	R\$ 1.827,42	R\$ 1.374,00	R\$ 1.319,04	R\$ 630.253,80
Auxiliar de Manutenção	12	R\$ 18.093,48	R\$ 2.005,36	R\$ 1.507,79	R\$ 1.447,48	R\$ 276.649,31
Auxiliar de limpeza	3	R\$ 15.816,84	R\$ 1.753,03	R\$ 1.318,07	R\$ 1.265,35	R\$ 60.459,87
Porteiro	3	R\$ 18.262,92	R\$ 2.024,14	R\$ 1.521,91	R\$ 1.461,03	R\$ 69.810,01
Estagiário	8	R\$ 14.400,00				R\$ 115.200,00

Fonte: Autoria própria (2022)

F.2 – Capital de giro

Para encontrar o Capital de Giro, utilizou-se a Equação F1, no qual relaciona os valores dos custos fixos e variáveis, durante um período de funcionamento da empresa.

$$\text{Capital de Giro} = \frac{(\text{Custo fixo} + \text{Custo Variável}) \times 3}{12} = R\$ 12.437.002,62 \quad (\text{F1})$$

F.3 – Financiamento mensal

Tabela F5 – Financiamento anual

SAC (Sistema de amortização constante)				
Mês	Prestação	Amortização	Juros	Saldo Devedor
1	R\$ 659.548,53	R\$ 194.328,17	R\$ 465.220,36	R\$ 46.444.431,67
2	R\$ 657.610,11	R\$ 194.328,17	R\$ 463.281,94	R\$ 46.250.103,50
3	R\$ 655.671,69	R\$ 194.328,17	R\$ 461.343,52	R\$ 46.055.775,33
4	R\$ 653.733,27	R\$ 194.328,17	R\$ 459.405,10	R\$ 45.861.447,16
5	R\$ 651.794,85	R\$ 194.328,17	R\$ 457.466,68	R\$ 45.667.118,99
6	R\$ 649.856,44	R\$ 194.328,17	R\$ 455.528,27	R\$ 45.472.790,82
7	R\$ 647.918,02	R\$ 194.328,17	R\$ 453.589,85	R\$ 45.278.462,65
8	R\$ 645.979,60	R\$ 194.328,17	R\$ 451.651,43	R\$ 45.084.134,48
9	R\$ 644.041,18	R\$ 194.328,17	R\$ 449.713,01	R\$ 44.889.806,31
10	R\$ 642.102,76	R\$ 194.328,17	R\$ 447.774,59	R\$ 44.695.478,14
11	R\$ 640.164,34	R\$ 194.328,17	R\$ 445.836,17	R\$ 44.501.149,97
12	R\$ 638.225,93	R\$ 194.328,17	R\$ 443.897,76	R\$ 44.306.821,80
13	R\$ 636.287,51	R\$ 194.328,17	R\$ 441.959,34	R\$ 44.112.493,63
14	R\$ 634.349,09	R\$ 194.328,17	R\$ 440.020,92	R\$ 43.918.165,46
15	R\$ 632.410,67	R\$ 194.328,17	R\$ 438.082,50	R\$ 43.723.837,29
16	R\$ 630.472,25	R\$ 194.328,17	R\$ 436.144,08	R\$ 43.529.509,12
17	R\$ 628.533,84	R\$ 194.328,17	R\$ 434.205,67	R\$ 43.335.180,95
18	R\$ 626.595,42	R\$ 194.328,17	R\$ 432.267,25	R\$ 43.140.852,78
19	R\$ 624.657,00	R\$ 194.328,17	R\$ 430.328,83	R\$ 42.946.524,61
20	R\$ 622.718,58	R\$ 194.328,17	R\$ 428.390,41	R\$ 42.752.196,44
21	R\$ 620.780,16	R\$ 194.328,17	R\$ 426.451,99	R\$ 42.557.868,27
22	R\$ 618.841,74	R\$ 194.328,17	R\$ 424.513,57	R\$ 42.363.540,10

23	R\$ 616.903,33	R\$ 194.328,17	R\$ 422.575,16	R\$ 42.169.211,93
24	R\$ 614.964,91	R\$ 194.328,17	R\$ 420.636,74	R\$ 41.974.883,76
25	R\$ 613.026,49	R\$ 194.328,17	R\$ 418.698,32	R\$ 41.780.555,59
26	R\$ 611.088,07	R\$ 194.328,17	R\$ 416.759,90	R\$ 41.586.227,42
27	R\$ 609.149,65	R\$ 194.328,17	R\$ 414.821,48	R\$ 41.391.899,25
28	R\$ 607.211,24	R\$ 194.328,17	R\$ 412.883,07	R\$ 41.197.571,08
29	R\$ 605.272,82	R\$ 194.328,17	R\$ 410.944,65	R\$ 41.003.242,91
30	R\$ 603.334,40	R\$ 194.328,17	R\$ 409.006,23	R\$ 40.808.914,74
31	R\$ 601.395,98	R\$ 194.328,17	R\$ 407.067,81	R\$ 40.614.586,57
32	R\$ 599.457,56	R\$ 194.328,17	R\$ 405.129,39	R\$ 40.420.258,40
33	R\$ 597.519,14	R\$ 194.328,17	R\$ 403.190,97	R\$ 40.225.930,23
34	R\$ 595.580,73	R\$ 194.328,17	R\$ 401.252,56	R\$ 40.031.602,06
35	R\$ 593.642,31	R\$ 194.328,17	R\$ 399.314,14	R\$ 39.837.273,89
36	R\$ 591.703,89	R\$ 194.328,17	R\$ 397.375,72	R\$ 39.642.945,72
37	R\$ 589.765,47	R\$ 194.328,17	R\$ 395.437,30	R\$ 39.448.617,55
38	R\$ 587.827,05	R\$ 194.328,17	R\$ 393.498,88	R\$ 39.254.289,38
39	R\$ 585.888,64	R\$ 194.328,17	R\$ 391.560,47	R\$ 39.059.961,21
40	R\$ 583.950,22	R\$ 194.328,17	R\$ 389.622,05	R\$ 38.865.633,04
41	R\$ 582.011,80	R\$ 194.328,17	R\$ 387.683,63	R\$ 38.671.304,87
42	R\$ 580.073,38	R\$ 194.328,17	R\$ 385.745,21	R\$ 38.476.976,70
43	R\$ 578.134,96	R\$ 194.328,17	R\$ 383.806,79	R\$ 38.282.648,53
44	R\$ 576.196,54	R\$ 194.328,17	R\$ 381.868,37	R\$ 38.088.320,36
45	R\$ 574.258,13	R\$ 194.328,17	R\$ 379.929,96	R\$ 37.893.992,19
46	R\$ 572.319,71	R\$ 194.328,17	R\$ 377.991,54	R\$ 37.699.664,02
47	R\$ 570.381,29	R\$ 194.328,17	R\$ 376.053,12	R\$ 37.505.335,85
48	R\$ 568.442,87	R\$ 194.328,17	R\$ 374.114,70	R\$ 37.311.007,68
49	R\$ 566.504,45	R\$ 194.328,17	R\$ 372.176,28	R\$ 37.116.679,51
50	R\$ 564.566,04	R\$ 194.328,17	R\$ 370.237,87	R\$ 36.922.351,34
51	R\$ 562.627,62	R\$ 194.328,17	R\$ 368.299,45	R\$ 36.728.023,17
52	R\$ 560.689,20	R\$ 194.328,17	R\$ 366.361,03	R\$ 36.533.695,00
53	R\$ 558.750,78	R\$ 194.328,17	R\$ 364.422,61	R\$ 36.339.366,83
54	R\$ 556.812,36	R\$ 194.328,17	R\$ 362.484,19	R\$ 36.145.038,66
55	R\$ 554.873,94	R\$ 194.328,17	R\$ 360.545,77	R\$ 35.950.710,49
56	R\$ 552.935,53	R\$ 194.328,17	R\$ 358.607,36	R\$ 35.756.382,32
57	R\$ 550.997,11	R\$ 194.328,17	R\$ 356.668,94	R\$ 35.562.054,15
58	R\$ 549.058,69	R\$ 194.328,17	R\$ 354.730,52	R\$ 35.367.725,98

59	R\$ 547.120,27	R\$ 194.328,17	R\$ 352.792,10	R\$ 35.173.397,81
60	R\$ 545.181,85	R\$ 194.328,17	R\$ 350.853,68	R\$ 34.979.069,64
61	R\$ 543.243,44	R\$ 194.328,17	R\$ 348.915,27	R\$ 34.784.741,47
62	R\$ 541.305,02	R\$ 194.328,17	R\$ 346.976,85	R\$ 34.590.413,30
63	R\$ 539.366,60	R\$ 194.328,17	R\$ 345.038,43	R\$ 34.396.085,13
64	R\$ 537.428,18	R\$ 194.328,17	R\$ 343.100,01	R\$ 34.201.756,96
65	R\$ 535.489,76	R\$ 194.328,17	R\$ 341.161,59	R\$ 34.007.428,79
66	R\$ 533.551,34	R\$ 194.328,17	R\$ 339.223,17	R\$ 33.813.100,62
67	R\$ 531.612,93	R\$ 194.328,17	R\$ 337.284,76	R\$ 33.618.772,45
68	R\$ 529.674,51	R\$ 194.328,17	R\$ 335.346,34	R\$ 33.424.444,28
69	R\$ 527.736,09	R\$ 194.328,17	R\$ 333.407,92	R\$ 33.230.116,11
70	R\$ 525.797,67	R\$ 194.328,17	R\$ 331.469,50	R\$ 33.035.787,94
71	R\$ 523.859,25	R\$ 194.328,17	R\$ 329.531,08	R\$ 32.841.459,77
72	R\$ 521.920,84	R\$ 194.328,17	R\$ 327.592,67	R\$ 32.647.131,60
73	R\$ 519.982,42	R\$ 194.328,17	R\$ 325.654,25	R\$ 32.452.803,43
74	R\$ 518.044,00	R\$ 194.328,17	R\$ 323.715,83	R\$ 32.258.475,26
75	R\$ 516.105,58	R\$ 194.328,17	R\$ 321.777,41	R\$ 32.064.147,09
76	R\$ 514.167,16	R\$ 194.328,17	R\$ 319.838,99	R\$ 31.869.818,92
77	R\$ 512.228,74	R\$ 194.328,17	R\$ 317.900,57	R\$ 31.675.490,75
78	R\$ 510.290,33	R\$ 194.328,17	R\$ 315.962,16	R\$ 31.481.162,58
79	R\$ 508.351,91	R\$ 194.328,17	R\$ 314.023,74	R\$ 31.286.834,41
80	R\$ 506.413,49	R\$ 194.328,17	R\$ 312.085,32	R\$ 31.092.506,24
81	R\$ 504.475,07	R\$ 194.328,17	R\$ 310.146,90	R\$ 30.898.178,07
82	R\$ 502.536,65	R\$ 194.328,17	R\$ 308.208,48	R\$ 30.703.849,90
83	R\$ 500.598,24	R\$ 194.328,17	R\$ 306.270,07	R\$ 30.509.521,73
84	R\$ 498.659,82	R\$ 194.328,17	R\$ 304.331,65	R\$ 30.315.193,56
85	R\$ 496.721,40	R\$ 194.328,17	R\$ 302.393,23	R\$ 30.120.865,39
86	R\$ 494.782,98	R\$ 194.328,17	R\$ 300.454,81	R\$ 29.926.537,22
87	R\$ 492.844,56	R\$ 194.328,17	R\$ 298.516,39	R\$ 29.732.209,05
88	R\$ 490.906,14	R\$ 194.328,17	R\$ 296.577,97	R\$ 29.537.880,88
89	R\$ 488.967,73	R\$ 194.328,17	R\$ 294.639,56	R\$ 29.343.552,71
90	R\$ 487.029,31	R\$ 194.328,17	R\$ 292.701,14	R\$ 29.149.224,54
91	R\$ 485.090,89	R\$ 194.328,17	R\$ 290.762,72	R\$ 28.954.896,37
92	R\$ 483.152,47	R\$ 194.328,17	R\$ 288.824,30	R\$ 28.760.568,20
93	R\$ 481.214,05	R\$ 194.328,17	R\$ 286.885,88	R\$ 28.566.240,03
94	R\$ 479.275,63	R\$ 194.328,17	R\$ 284.947,46	R\$ 28.371.911,86

95	R\$ 477.337,22	R\$ 194.328,17	R\$ 283.009,05	R\$ 28.177.583,69
96	R\$ 475.398,80	R\$ 194.328,17	R\$ 281.070,63	R\$ 27.983.255,52
97	R\$ 473.460,38	R\$ 194.328,17	R\$ 279.132,21	R\$ 27.788.927,35
98	R\$ 471.521,96	R\$ 194.328,17	R\$ 277.193,79	R\$ 27.594.599,18
99	R\$ 469.583,54	R\$ 194.328,17	R\$ 275.255,37	R\$ 27.400.271,01
100	R\$ 467.645,13	R\$ 194.328,17	R\$ 273.316,96	R\$ 27.205.942,84
101	R\$ 465.706,71	R\$ 194.328,17	R\$ 271.378,54	R\$ 27.011.614,67
102	R\$ 463.768,29	R\$ 194.328,17	R\$ 269.440,12	R\$ 26.817.286,50
103	R\$ 461.829,87	R\$ 194.328,17	R\$ 267.501,70	R\$ 26.622.958,33
104	R\$ 459.891,45	R\$ 194.328,17	R\$ 265.563,28	R\$ 26.428.630,16
105	R\$ 457.953,03	R\$ 194.328,17	R\$ 263.624,86	R\$ 26.234.301,99
106	R\$ 456.014,62	R\$ 194.328,17	R\$ 261.686,45	R\$ 26.039.973,82
107	R\$ 454.076,20	R\$ 194.328,17	R\$ 259.748,03	R\$ 25.845.645,65
108	R\$ 452.137,78	R\$ 194.328,17	R\$ 257.809,61	R\$ 25.651.317,48
109	R\$ 450.199,36	R\$ 194.328,17	R\$ 255.871,19	R\$ 25.456.989,31
110	R\$ 448.260,94	R\$ 194.328,17	R\$ 253.932,77	R\$ 25.262.661,14
111	R\$ 446.322,53	R\$ 194.328,17	R\$ 251.994,36	R\$ 25.068.332,97
112	R\$ 444.384,11	R\$ 194.328,17	R\$ 250.055,94	R\$ 24.874.004,80
113	R\$ 442.445,69	R\$ 194.328,17	R\$ 248.117,52	R\$ 24.679.676,63
114	R\$ 440.507,27	R\$ 194.328,17	R\$ 246.179,10	R\$ 24.485.348,46
115	R\$ 438.568,85	R\$ 194.328,17	R\$ 244.240,68	R\$ 24.291.020,29
116	R\$ 436.630,43	R\$ 194.328,17	R\$ 242.302,26	R\$ 24.096.692,12
117	R\$ 434.692,02	R\$ 194.328,17	R\$ 240.363,85	R\$ 23.902.363,95
118	R\$ 432.753,60	R\$ 194.328,17	R\$ 238.425,43	R\$ 23.708.035,78
119	R\$ 430.815,18	R\$ 194.328,17	R\$ 236.487,01	R\$ 23.513.707,61
120	R\$ 428.876,76	R\$ 194.328,17	R\$ 234.548,59	R\$ 23.319.379,44
121	R\$ 426.938,34	R\$ 194.328,17	R\$ 232.610,17	R\$ 23.125.051,27
122	R\$ 424.999,93	R\$ 194.328,17	R\$ 230.671,76	R\$ 22.930.723,10
123	R\$ 423.061,51	R\$ 194.328,17	R\$ 228.733,34	R\$ 22.736.394,93
124	R\$ 421.123,09	R\$ 194.328,17	R\$ 226.794,92	R\$ 22.542.066,76
125	R\$ 419.184,67	R\$ 194.328,17	R\$ 224.856,50	R\$ 22.347.738,59
126	R\$ 417.246,25	R\$ 194.328,17	R\$ 222.918,08	R\$ 22.153.410,42
127	R\$ 415.307,83	R\$ 194.328,17	R\$ 220.979,66	R\$ 21.959.082,25
128	R\$ 413.369,42	R\$ 194.328,17	R\$ 219.041,25	R\$ 21.764.754,08
129	R\$ 411.431,00	R\$ 194.328,17	R\$ 217.102,83	R\$ 21.570.425,91
130	R\$ 409.492,58	R\$ 194.328,17	R\$ 215.164,41	R\$ 21.376.097,74

131	R\$ 407.554,16	R\$ 194.328,17	R\$ 213.225,99	R\$ 21.181.769,57
132	R\$ 405.615,74	R\$ 194.328,17	R\$ 211.287,57	R\$ 20.987.441,40
133	R\$ 403.677,33	R\$ 194.328,17	R\$ 209.349,16	R\$ 20.793.113,23
134	R\$ 401.738,91	R\$ 194.328,17	R\$ 207.410,74	R\$ 20.598.785,06
135	R\$ 399.800,49	R\$ 194.328,17	R\$ 205.472,32	R\$ 20.404.456,89
136	R\$ 397.862,07	R\$ 194.328,17	R\$ 203.533,90	R\$ 20.210.128,72
137	R\$ 395.923,65	R\$ 194.328,17	R\$ 201.595,48	R\$ 20.015.800,55
138	R\$ 393.985,23	R\$ 194.328,17	R\$ 199.657,06	R\$ 19.821.472,38
139	R\$ 392.046,82	R\$ 194.328,17	R\$ 197.718,65	R\$ 19.627.144,21
140	R\$ 390.108,40	R\$ 194.328,17	R\$ 195.780,23	R\$ 19.432.816,04
141	R\$ 388.169,98	R\$ 194.328,17	R\$ 193.841,81	R\$ 19.238.487,87
142	R\$ 386.231,56	R\$ 194.328,17	R\$ 191.903,39	R\$ 19.044.159,70
143	R\$ 384.293,14	R\$ 194.328,17	R\$ 189.964,97	R\$ 18.849.831,53
144	R\$ 382.354,73	R\$ 194.328,17	R\$ 188.026,56	R\$ 18.655.503,36
145	R\$ 380.416,31	R\$ 194.328,17	R\$ 186.088,14	R\$ 18.461.175,19
146	R\$ 378.477,89	R\$ 194.328,17	R\$ 184.149,72	R\$ 18.266.847,02
147	R\$ 376.539,47	R\$ 194.328,17	R\$ 182.211,30	R\$ 18.072.518,85
148	R\$ 374.601,05	R\$ 194.328,17	R\$ 180.272,88	R\$ 17.878.190,68
149	R\$ 372.662,63	R\$ 194.328,17	R\$ 178.334,46	R\$ 17.683.862,51
150	R\$ 370.724,22	R\$ 194.328,17	R\$ 176.396,05	R\$ 17.489.534,34
151	R\$ 368.785,80	R\$ 194.328,17	R\$ 174.457,63	R\$ 17.295.206,17
152	R\$ 366.847,38	R\$ 194.328,17	R\$ 172.519,21	R\$ 17.100.878,00
153	R\$ 364.908,96	R\$ 194.328,17	R\$ 170.580,79	R\$ 16.906.549,83
154	R\$ 362.970,54	R\$ 194.328,17	R\$ 168.642,37	R\$ 16.712.221,66
155	R\$ 361.032,13	R\$ 194.328,17	R\$ 166.703,96	R\$ 16.517.893,49
156	R\$ 359.093,71	R\$ 194.328,17	R\$ 164.765,54	R\$ 16.323.565,32
157	R\$ 357.155,29	R\$ 194.328,17	R\$ 162.827,12	R\$ 16.129.237,15
158	R\$ 355.216,87	R\$ 194.328,17	R\$ 160.888,70	R\$ 15.934.908,98
159	R\$ 353.278,45	R\$ 194.328,17	R\$ 158.950,28	R\$ 15.740.580,81
160	R\$ 351.340,03	R\$ 194.328,17	R\$ 157.011,86	R\$ 15.546.252,64
161	R\$ 349.401,62	R\$ 194.328,17	R\$ 155.073,45	R\$ 15.351.924,47
162	R\$ 347.463,20	R\$ 194.328,17	R\$ 153.135,03	R\$ 15.157.596,30
163	R\$ 345.524,78	R\$ 194.328,17	R\$ 151.196,61	R\$ 14.963.268,13
164	R\$ 343.586,36	R\$ 194.328,17	R\$ 149.258,19	R\$ 14.768.939,96
165	R\$ 341.647,94	R\$ 194.328,17	R\$ 147.319,77	R\$ 14.574.611,79
166	R\$ 339.709,52	R\$ 194.328,17	R\$ 145.381,35	R\$ 14.380.283,62

167	R\$ 337.771,11	R\$ 194.328,17	R\$ 143.442,94	R\$ 14.185.955,45
168	R\$ 335.832,69	R\$ 194.328,17	R\$ 141.504,52	R\$ 13.991.627,28
169	R\$ 333.894,27	R\$ 194.328,17	R\$ 139.566,10	R\$ 13.797.299,11
170	R\$ 331.955,85	R\$ 194.328,17	R\$ 137.627,68	R\$ 13.602.970,94
171	R\$ 330.017,43	R\$ 194.328,17	R\$ 135.689,26	R\$ 13.408.642,77
172	R\$ 328.079,02	R\$ 194.328,17	R\$ 133.750,85	R\$ 13.214.314,60
173	R\$ 326.140,60	R\$ 194.328,17	R\$ 131.812,43	R\$ 13.019.986,43
174	R\$ 324.202,18	R\$ 194.328,17	R\$ 129.874,01	R\$ 12.825.658,26
175	R\$ 322.263,76	R\$ 194.328,17	R\$ 127.935,59	R\$ 12.631.330,09
176	R\$ 320.325,34	R\$ 194.328,17	R\$ 125.997,17	R\$ 12.437.001,92
177	R\$ 318.386,92	R\$ 194.328,17	R\$ 124.058,75	R\$ 12.242.673,75
178	R\$ 316.448,51	R\$ 194.328,17	R\$ 122.120,34	R\$ 12.048.345,58
179	R\$ 314.510,09	R\$ 194.328,17	R\$ 120.181,92	R\$ 11.854.017,41
180	R\$ 312.571,67	R\$ 194.328,17	R\$ 118.243,50	R\$ 11.659.689,24
181	R\$ 310.633,25	R\$ 194.328,17	R\$ 116.305,08	R\$ 11.465.361,07
182	R\$ 308.694,83	R\$ 194.328,17	R\$ 114.366,66	R\$ 11.271.032,90
183	R\$ 306.756,42	R\$ 194.328,17	R\$ 112.428,25	R\$ 11.076.704,73
184	R\$ 304.818,00	R\$ 194.328,17	R\$ 110.489,83	R\$ 10.882.376,56
185	R\$ 302.879,58	R\$ 194.328,17	R\$ 108.551,41	R\$ 10.688.048,39
186	R\$ 300.941,16	R\$ 194.328,17	R\$ 106.612,99	R\$ 10.493.720,22
187	R\$ 299.002,74	R\$ 194.328,17	R\$ 104.674,57	R\$ 10.299.392,05
188	R\$ 297.064,32	R\$ 194.328,17	R\$ 102.736,15	R\$ 10.105.063,88
189	R\$ 295.125,91	R\$ 194.328,17	R\$ 100.797,74	R\$ 9.910.735,71
190	R\$ 293.187,49	R\$ 194.328,17	R\$ 98.859,32	R\$ 9.716.407,54
191	R\$ 291.249,07	R\$ 194.328,17	R\$ 96.920,90	R\$ 9.522.079,37
192	R\$ 289.310,65	R\$ 194.328,17	R\$ 94.982,48	R\$ 9.327.751,20
193	R\$ 287.372,23	R\$ 194.328,17	R\$ 93.044,06	R\$ 9.133.423,03
194	R\$ 285.433,82	R\$ 194.328,17	R\$ 91.105,65	R\$ 8.939.094,86
195	R\$ 283.495,40	R\$ 194.328,17	R\$ 89.167,23	R\$ 8.744.766,69
196	R\$ 281.556,98	R\$ 194.328,17	R\$ 87.228,81	R\$ 8.550.438,52
197	R\$ 279.618,56	R\$ 194.328,17	R\$ 85.290,39	R\$ 8.356.110,35
198	R\$ 277.680,14	R\$ 194.328,17	R\$ 83.351,97	R\$ 8.161.782,18
199	R\$ 275.741,72	R\$ 194.328,17	R\$ 81.413,55	R\$ 7.967.454,01
200	R\$ 273.803,31	R\$ 194.328,17	R\$ 79.475,14	R\$ 7.773.125,84
201	R\$ 271.864,89	R\$ 194.328,17	R\$ 77.536,72	R\$ 7.578.797,67
202	R\$ 269.926,47	R\$ 194.328,17	R\$ 75.598,30	R\$ 7.384.469,50

203	R\$ 267.988,05	R\$ 194.328,17	R\$ 73.659,88	R\$ 7.190.141,33
204	R\$ 266.049,63	R\$ 194.328,17	R\$ 71.721,46	R\$ 6.995.813,16
205	R\$ 264.111,22	R\$ 194.328,17	R\$ 69.783,05	R\$ 6.801.484,99
206	R\$ 262.172,80	R\$ 194.328,17	R\$ 67.844,63	R\$ 6.607.156,82
207	R\$ 260.234,38	R\$ 194.328,17	R\$ 65.906,21	R\$ 6.412.828,65
208	R\$ 258.295,96	R\$ 194.328,17	R\$ 63.967,79	R\$ 6.218.500,48
209	R\$ 256.357,54	R\$ 194.328,17	R\$ 62.029,37	R\$ 6.024.172,31
210	R\$ 254.419,12	R\$ 194.328,17	R\$ 60.090,95	R\$ 5.829.844,14
211	R\$ 252.480,71	R\$ 194.328,17	R\$ 58.152,54	R\$ 5.635.515,97
212	R\$ 250.542,29	R\$ 194.328,17	R\$ 56.214,12	R\$ 5.441.187,80
213	R\$ 248.603,87	R\$ 194.328,17	R\$ 54.275,70	R\$ 5.246.859,63
214	R\$ 246.665,45	R\$ 194.328,17	R\$ 52.337,28	R\$ 5.052.531,46
215	R\$ 244.727,03	R\$ 194.328,17	R\$ 50.398,86	R\$ 4.858.203,29
216	R\$ 242.788,62	R\$ 194.328,17	R\$ 48.460,45	R\$ 4.663.875,12
217	R\$ 240.850,20	R\$ 194.328,17	R\$ 46.522,03	R\$ 4.469.546,95
218	R\$ 238.911,78	R\$ 194.328,17	R\$ 44.583,61	R\$ 4.275.218,78
219	R\$ 236.973,36	R\$ 194.328,17	R\$ 42.645,19	R\$ 4.080.890,61
220	R\$ 235.034,94	R\$ 194.328,17	R\$ 40.706,77	R\$ 3.886.562,44
221	R\$ 233.096,52	R\$ 194.328,17	R\$ 38.768,35	R\$ 3.692.234,27
222	R\$ 231.158,11	R\$ 194.328,17	R\$ 36.829,94	R\$ 3.497.906,10
223	R\$ 229.219,69	R\$ 194.328,17	R\$ 34.891,52	R\$ 3.303.577,93
224	R\$ 227.281,27	R\$ 194.328,17	R\$ 32.953,10	R\$ 3.109.249,76
225	R\$ 225.342,85	R\$ 194.328,17	R\$ 31.014,68	R\$ 2.914.921,59
226	R\$ 223.404,43	R\$ 194.328,17	R\$ 29.076,26	R\$ 2.720.593,42
227	R\$ 221.466,02	R\$ 194.328,17	R\$ 27.137,85	R\$ 2.526.265,25
228	R\$ 219.527,60	R\$ 194.328,17	R\$ 25.199,43	R\$ 2.331.937,08
229	R\$ 217.589,18	R\$ 194.328,17	R\$ 23.261,01	R\$ 2.137.608,91
230	R\$ 215.650,76	R\$ 194.328,17	R\$ 21.322,59	R\$ 1.943.280,74
231	R\$ 213.712,34	R\$ 194.328,17	R\$ 19.384,17	R\$ 1.748.952,57
232	R\$ 211.773,92	R\$ 194.328,17	R\$ 17.445,75	R\$ 1.554.624,40
233	R\$ 209.835,51	R\$ 194.328,17	R\$ 15.507,34	R\$ 1.360.296,23
234	R\$ 207.897,09	R\$ 194.328,17	R\$ 13.568,92	R\$ 1.165.968,06
235	R\$ 205.958,67	R\$ 194.328,17	R\$ 11.630,50	R\$ 971.639,89
236	R\$ 204.020,25	R\$ 194.328,17	R\$ 9.692,08	R\$ 777.311,72
237	R\$ 202.081,83	R\$ 194.328,17	R\$ 7.753,66	R\$ 582.983,55
238	R\$ 200.143,42	R\$ 194.328,17	R\$ 5.815,25	R\$ 388.655,38

239	R\$ 198.205,00	R\$ 194.328,17	R\$ 3.876,83	R\$ 194.327,21
240	R\$ 196.266,58	R\$ 194.327,21	R\$ 1.938,41	R\$ 0,00
TOTAL	R\$ 102.697.812,67	R\$ 46.638.759,84	R\$ 56.059.051,87	

Fonte: Autoria própria (2022)

F.4 – Fluxo de caixa

Tabela F6 - Fluxo de caixa

Ano	1	2	3	4
(+) Receita bruta anual	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45
(-) Impostos diretos	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29
(-) Custos operacionais	-R\$ 22.108.093,97	-R\$ 21.828.961,75	-R\$ 21.549.829,53	-R\$ 21.270.697,31
(=) EBITDA	R\$ 59.560.860,19	R\$ 59.839.992,41	R\$ 60.119.124,63	R\$ 60.398.256,85
(-) Depreciação	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43
(-) Despesa Financeira	-R\$ 5.454.708,68	-R\$ 5.175.576,46	-R\$ 4.896.444,24	-R\$ 4.617.312,02
(=) Lucro Líquido antes dos impostos (LAIR)	R\$ 48.853.870,08	R\$ 49.412.134,52	R\$ 49.970.398,96	R\$ 50.528.663,40
(-) IRPJ+CSSL+ADIRPJ	-R\$ 21.495.702,83	-R\$ 21.741.339,19	-R\$ 21.986.975,54	-R\$ 22.232.611,90
(=) Lucro Líquido depois dos impostos	R\$ 27.358.167,24	R\$ 27.670.795,33	R\$ 27.983.423,42	R\$ 28.296.051,50
(-) Amortização Financeiro	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04
(=) Fluxo de caixa	R\$ 25.026.229,20	R\$ 25.338.857,29	R\$ 25.651.485,38	R\$ 25.964.113,46

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela F7 - Fluxo de caixa

Ano	5	6	7	8
(+) Receita bruta anual	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45
(-) Impostos diretos	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29
(-) Custos operacionais	-R\$ 20.997.567,58	-R\$ 20.712.432,88	-R\$ 20.433.300,66	-R\$ 20.154.168,43
(=) EBITDA	R\$ 60.671.386,58	R\$ 60.956.521,28	R\$ 61.235.653,50	R\$ 61.514.785,73
(-) Depreciação	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43
(-) Despesa Financeira	-R\$ 4.342.087,95	-R\$ 4.059.047,59	-R\$ 3.779.915,37	-R\$ 3.500.783,14
(=) Lucro Líquido antes dos impostos (LAIR)	R\$ 51.077.017,20	R\$ 51.645.192,26	R\$ 52.203.456,70	R\$ 52.761.721,16
(-) IRPJ+CSSL+ADIRPJ	-R\$ 22.473.887,57	-R\$ 22.723.884,59	-R\$ 22.969.520,95	-R\$ 23.215.157,31
(=) Lucro Líquido depois dos impostos	R\$ 28.603.129,63	R\$ 28.921.307,66	R\$ 29.233.935,75	R\$ 29.546.563,85
(-) Amortização Financeiro	-R\$ 2.334.032,40	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04
(=) Fluxo de caixa	R\$ 26.269.097,23	R\$ 26.589.369,62	R\$ 26.901.997,71	R\$ 27.214.625,81

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela F8 - Fluxo de caixa

Ano	9	10	11	12
(+) Receita bruta anual	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45
(-) Impostos diretos	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29
(-) Custos operacionais	-R\$ 19.875.036,21	-R\$ 19.595.903,99	-R\$ 19.316.771,77	-R\$ 19.037.639,56
(=) EBITDA	R\$ 61.793.917,95	R\$ 62.073.050,17	R\$ 62.352.182,39	R\$ 62.631.314,60
(-) Depreciação	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43
(-) Despesa Financeira	-3.221.650,92	-2.942.518,70	-2.663.386,48	-2.384.254,27
(=) Lucro Líquido antes dos impostos (LAIR)	R\$ 53.319.985,60	R\$ 53.878.250,04	R\$ 54.436.514,48	R\$ 54.994.778,90
(-) IRPJ+CSSL+ADIRPJ	-R\$ 23.460.793,66	-R\$ 23.706.430,02	-R\$ 23.952.066,37	-R\$ 24.197.702,72
(=) Lucro Líquido depois dos impostos	R\$ 29.859.191,94	R\$ 30.171.820,02	R\$ 30.484.448,11	R\$ 30.797.076,18
(-) Amortização Financeiro	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04
(=) Fluxo de caixa	R\$ 27.527.253,90	R\$ 27.839.881,98	R\$ 28.152.510,07	R\$ 28.465.138,14

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela F940 - Fluxo de caixa

Ano	13	14	15	16
(+) Receita bruta anual	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45
(-) Impostos diretos	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29
(-) Custos operacionais	-R\$ 18.758.507,34	-R\$ 18.479.375,11	-R\$ 18.200.242,89	-R\$ 17.921.110,67
(=) EBITDA	R\$ 62.910.446,82	R\$ 63.189.579,05	R\$ 63.468.711,27	R\$ 63.747.843,49
(-) Depreciação	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43
(-) Despesa Financeira	-R\$ 2.105.122,05	-R\$ 1.825.989,82	-R\$ 1.546.857,60	-R\$ 1.267.725,38
(=) Lucro Líquido antes dos impostos (LAIR)	R\$ 55.553.043,34	R\$ 56.111.307,80	R\$ 56.669.572,24	R\$ 57.227.836,68
(-) IRPJ+CSSL+ADIRPJ	-R\$ 24.443.339,07	-R\$ 24.688.975,43	-R\$ 24.934.611,78	-R\$ 25.180.248,14
(=) Lucro Líquido depois dos impostos	R\$ 31.109.704,27	R\$ 31.422.332,37	R\$ 31.734.960,45	R\$ 32.047.588,54
(-) Amortização Financeiro	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04
(=) Fluxo de caixa	R\$ 28.777.766,23	R\$ 29.090.394,33	R\$ 29.403.022,41	R\$ 29.715.650,50

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela F 1 - Fluxo de caixa

Ano	17	18	19	20
(+) Receita bruta anual	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45	R\$ 125.355.263,45
(-) Impostos diretos	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29	-R\$ 43.686.309,29
(-) Custos operacionais	-R\$ 17.641.978,45	-R\$ 17.362.846,24	-R\$ 17.083.714,02	-R\$ 16.804.581,80
(=) EBITDA	R\$ 64.026.975,71	R\$ 64.306.107,92	R\$ 64.585.240,14	R\$ 64.864.372,36
(-) Depreciação	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43	-R\$ 5.252.281,43
(-) Despesa Financeira	-R\$ 988.593,16	-R\$ 709.460,95	-R\$ 430.328,73	-R\$ 151.196,51
(=) Lucro Líquido antes dos impostos (LAIR)	R\$ 57.786.101,12	R\$ 58.344.365,54	R\$ 58.902.629,98	R\$ 59.460.894,42
(-) IRPJ+CSSL+ADIRPJ	-R\$ 25.425.884,49	-R\$ 25.671.520,84	-R\$ 25.917.157,19	-R\$ 26.162.793,54
(=) Lucro Líquido depois dos impostos	R\$ 32.360.216,63	R\$ 32.672.844,70	R\$ 32.985.472,79	R\$ 33.298.100,87
(-) Amortização Financeiro	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04	-R\$ 2.331.938,04
(=) Fluxo de caixa	R\$ 30.028.278,59	R\$ 30.340.906,66	R\$ 30.653.534,75	R\$ 30.966.162,83

Fonte: Autoria própria (2022)

F.4 – VPL e Payback

Tabela F11 - VPL e Payback

Ano	Fluxo	VPL	PAYBACK
0	-R\$ 62.185.013,12	-R\$ 62.185.013,12	-R\$ 102.697.812,67
1	R\$ 25.026.229,20	R\$ 21.030.444,71	-R\$ 81.667.367,96
2	R\$ 25.338.857,29	R\$ 21.293.157,39	-R\$ 60.374.210,57
3	R\$ 25.651.485,38	R\$ 21.555.870,06	-R\$ 38.818.340,51
4	R\$ 25.964.113,46	R\$ 21.818.582,74	-R\$ 16.999.757,77
5	R\$ 26.269.097,23	R\$ 22.074.871,62	R\$ 5.075.113,86
6	R\$ 26.589.369,62	R\$ 22.344.008,09	R\$ 27.419.121,94
7	R\$ 26.901.997,71	R\$ 22.606.720,77	R\$ 50.025.842,71
8	R\$ 27.214.625,81	R\$ 22.869.433,45	R\$ 72.895.276,16
9	R\$ 27.527.253,90	R\$ 23.132.146,13	R\$ 96.027.422,29
10	R\$ 27.839.881,98	R\$ 23.394.858,81	R\$ 119.422.281,10
11	R\$ 28.152.510,07	R\$ 23.657.571,49	R\$ 143.079.852,59
12	R\$ 28.465.138,14	R\$ 23.920.284,15	R\$ 167.000.136,74
13	R\$ 28.777.766,23	R\$ 24.182.996,83	R\$ 191.183.133,57
14	R\$ 29.090.394,33	R\$ 24.445.709,52	R\$ 215.628.843,09
15	R\$ 29.403.022,41	R\$ 24.708.422,20	R\$ 240.337.265,29
16	R\$ 29.715.650,50	R\$ 24.971.134,87	R\$ 265.308.400,16
17	R\$ 30.028.278,59	R\$ 25.233.847,55	R\$ 290.542.247,71
18	R\$ 30.340.906,66	R\$ 25.496.560,22	R\$ 316.038.807,93
19	R\$ 30.653.534,75	R\$ 25.759.272,90	R\$ 341.798.080,83
20	R\$ 30.966.162,83	R\$ 26.021.985,58	R\$ 367.820.066,41

Fonte: Autoria própria (2022)