



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**ESCOLA DE QUÍMICA**



**PROJETO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS  
ALIMENTARES UTILIZANDO O SIMULADOR *SUPERPRO DESIGNER*®**

**VICTOR HUGO AMORIM RIQUE**

**RIO DE JANEIRO**

**2021**

**VICTOR HUGO AMORIM RIQUE**

**PROJETO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS  
ALIMENTARES UTILIZANDO O SIMULADOR *SUPERPRO DESIGNER*®**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Química da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para  
a obtenção do título de bacharel em Engenharia  
de Bioprocessos.

Orientadores: Maria Antonieta Peixoto Gimenes Couto (*D.Sc.*)  
Claudinei de Souza Guimarães (*D.Sc.*)

**RIO DE JANEIRO**

**2021**

## FICHA CATOGRÁFICA

R594p Rique, Victor Hugo Amorim  
PROJETO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS A PARTIR DE  
RESÍDUOS ALIMENTARES UTILIZANDO O SIMULADOR  
SUPERPRO DESIGNER® / Victor Hugo Amorim Rique. --  
Rio de Janeiro, 2021.  
121 f.

Orientadora: Maria Antonieta Peixoto Gimenes  
Couto.

Coorientador: Claudinei de Souza Guimarães.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de  
Química, Bacharel em Engenharia de Bioprocessos,  
2021.

1. Biogás. 2. Resíduos alimentares. 3. Simulação  
de processos. 4. SuperPro Designer. I. Couto, Maria  
Antonieta Peixoto Gimenes, orient. II. Guimarães,  
Claudinei de Souza, coorient. III. Título.

**PROJETO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS  
ALIMENTARES UTILIZANDO O SIMULADOR *SUPERPRO DESIGNER*®**

***Victor Hugo Amorim Rique***

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos

Aprovado por:

---

Prof. Elcio Ribeiro Borges, *D.Sc.*

---

Leidiane Ferronato Mariani, *D.Sc.*

Orientado por:

---

Prof.<sup>a</sup> Maria Antonieta Peixoto Gimenes Couto, *D.Sc.*

---

Prof. Claudinei de Souza Guimarães, *D.Sc.*

Rio de Janeiro

2021

*Dedico este trabalho primeiramente à minha mãe, quem desde sempre não mediu esforços para que eu pudesse ter a oportunidade de chegar a esta etapa na minha vida, ao meu tio, Leonardo Araújo de Amorim, quem infelizmente nos deixou enquanto este trabalho era escrito mas cuja alegria e brincadeiras sempre farão parte das melhores memórias da nossa família, e, finalmente, a mim mesmo, por persistir neste meu sonho, superando as muitas dificuldades e adversidades que por diversas vezes tentaram me fazer desistir e abandoná-lo.*

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Ana Paula, por desde cedo batalhar, durante muitos anos de domingo a domingo, para que eu e minha irmã tivéssemos condições de correr atrás das melhores oportunidades para nossa vida, incentivando nossos estudos, apoiando nossos sonhos não importando a dificuldade, sendo uma figura exemplar, como mãe, amiga e educadora.

À minha avó, Harmonia, por ter nos acolhido ainda pequenos mesmo que isso significasse fazer sacrifícios e renunciar em partes à sua liberdade e independência financeira, tão duramente conquistadas.

Ao meu avô, Reinaldo por todos os seus conselhos e criação, assim como à minha irmã Annelise, minha madrinha, Rúbia, meus tios, Gil Reinaldo; Leonardo e Leandro, e toda nossa família, seja em Saquarema ou Portugal, por sempre estarem presentes ao longo de toda minha vida.

Ao meu pai, pela criação e educação ainda que ao seu jeito.

Ao meu bem, Bárbara Lira, pelo amor, apoio, dedicação e respeito incondicionais, além de todos os dias maravilhosos que já passamos juntos e pelos futuros que ainda hão de vir.

À minha melhor amiga Carolina Porto, por todos os momentos de cumplicidade e diversão, pelo amor, apoio, conselhos e uma amizade inabalável que só se fortalece a cada ano que passa. Capricornianos unidos, jamais serão vencidos!

Aos meus amigos da vida, de CPII, UFRJ e de INEA, por me acompanharem fazendo dessa trajetória de vida sempre mais leve e divertida.

Ao meu ex-gerente e atual diretor, amigo e mentor, Ricardo Marcelo, pelo apoio, ensino e provocações diárias que me tornam não só um profissional, mas também uma pessoa melhor. Muito obrigado por acreditar e me ensinar a confiar no meu próprio potencial!

À minha orientadora prof. Michelle, por todo suporte ao longo destes últimos anos na faculdade, sempre acreditando na minha capacidade e vindo ao meu auxílio nos momentos de necessidade.

Aos meus orientadores, prof. Claudinei e, em especial à professora Maria Antonieta, quem incitou esse meu interesse pelo tema durante suas aulas de Biocombustíveis e Biorrefinarias, e quem sempre me apoiou a dar prosseguimento à construção deste trabalho, mesmo quando eu sumia, por vezes por anos inteiros. Muito obrigado por estarem comigo e não terem desistido mesmo com esse meu calendário e ritmo maluco!

À Agência Nacional do Petróleo - ANP por fomentar o desenvolvimento da pesquisa em biocombustíveis através de seu Programa de Formação de Recursos Humanos. Deixo agradecimento especial ao PRH 41, programa este que participei como aluno não bolsista.

E por último, mas não menos importante, às minhas filhotas felinas, Lua e Mia, razões maiores da minha vida e felicidades do meu dia a dia.

A todos aqui citados, amo vocês!

## RESUMO

O crescimento populacional nas últimas décadas tem impactado diretamente no aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), formados majoritariamente por matéria orgânica, em especial resíduos alimentares. Sua decomposição em lixões e aterros gera contaminação do solo e águas subterrâneas, emissão de gases de efeito estufa (GEE), sob a forma de biogás, além de outros problemas de cunho sanitário e social. Promulgada em 2010, a fim de cessar estes impactos negativos, a Política Nacional Resíduos Sólidos do Brasil lançou novas diretrizes na gestão de RSU, obrigando sua recuperação e valorização por métodos e alternativas sustentáveis, antes da sua disposição final em aterros. Neste contexto, destacam-se as tecnologias de digestão anaeróbia, capazes de tratar a matéria orgânica de forma semelhante aos aterros, porém sem seus efeitos deletérios, gerando uma matéria orgânica que pode ser comercializada como fertilizante, e um biogás de qualidade, que pode ser aproveitado energeticamente na geração de calor e eletricidade. Diante desse potencial, o presente trabalho foi concebido com o intuito de propor uma planta de biogás a partir da digestão anaeróbia dos resíduos alimentares gerados pelo Restaurante Universitário Central da UFRJ, avaliando seu potencial energético bem como viabilidade econômica. Para tal utilizou-se o software *SUPERPRO DESIGNER*®, uma ferramenta computacional capaz de modelar, simular e avaliar processos químicos e bioquímicos, o que permitiu a elaboração, otimização e análise de viabilidade do projeto. A simulação foi conduzida admitindo-se como cenário o tratamento diário de 786kg de resíduos alimentares em regime de alimentação contínua, durante um ciclo operacional de 330 dias. O desenho do processo, equipamentos e suas configurações foram definidos com base nos dados da literatura, enquanto a análise preliminar dos custos foi gerada a partir de modelo e valores sugeridos pelo programa, sendo posteriormente confrontada com a literatura. Os resultados obtidos sinalizam que a planta se apresentou tecnicamente promissora, com uma produção diária de 204 m<sup>3</sup> de biogás, proporcionando uma redução mensal de 3.500m<sup>3</sup> no consumo de gás natural além de uma economia de R\$ 15.562,00 com gastos equivalente à disposição anual de 259,38 toneladas de resíduos. Do ponto de vista econômico, os resultados mostraram um alto custo na implantação e operação do projeto, apresentando valores acima do encontrado na literatura. Tal disparidade se deve aos critérios assumidos pelo programa, uma vez que os valores sugeridos pelo *SUPERPRO DESIGNER*®, são bastante diferentes da realidade brasileira, havendo, portanto, uma boa margem para redução do capital investido.

**Palavras-chave:** Biogás. Resíduos alimentares. Simulação de processos. SuperPro Designer.



## ABSTRACT

Population growth in recent decades has directly impacted the increase in the generation of municipal solid waste (MSW), mainly formed by organic matter, especially food waste. Its decomposition in dumps and landfills generates contamination of soil and groundwater, emission of greenhouse gases (GHG) in the form of biogas, in addition to other health and social problems. Enacted in 2010, in order to cease these negative impacts, The Brazilian National Solid Waste Policy has launched new guidelines in the management of MSW, obliging its recovery and valorization by sustainable methods and alternatives, before its final disposal in landfills. In this context, the anaerobic digestion technologies stand out, capable of treating organic matter in a similar way to landfills, but without its deleterious effects, generating an organic matter to be commercialized as fertilizer, and a quality biogas, which can be used energetically in the generation of heat and electricity. Given this potential, the present study was conceived with the purpose of proposing a biogas plant from the anaerobic digestion of food waste generated by the Central University Restaurant of UFRJ, evaluating its energy potential as well as economic viability. For this purpose, the SUPERPRO DESIGNER® software was used, which is a computational tool capable of modeling, simulating and evaluating chemical and biochemical processes, which allowed the elaboration, optimization and feasibility analysis of the project. The simulation was conducted assuming as a scenario the daily treatment of 786kg of food waste under continuous feeding regime, during an operational cycle of 330 days. The design of the process, equipment and its configurations were defined based on the literature data, while the preliminary analysis of costs was generated from its own model and values suggested by the software, and was later confronted with the literature data. The results obtained indicate that the plant was technically promising, with a daily production of 204 m<sup>3</sup> of biogas, providing a monthly reduction of 3,500m<sup>3</sup> in natural gas consumption in addition to a savings of R\$ 15,562.00 with expenses equivalent to the annual disposal of 259.38 tons of waste. From the economic point of view, the results showed a high cost in the implementation and operation of the project, presenting values above that found in the literature. Probably this disparity is due to the criteria assumed by the program, since the values suggested by SUPERPRO DESIGNER®, are quite different from the Brazilian reality, thus having a good margin for reducing the invested capital.

Keywords: Biogas. Food waste. Process simulation. SuperPro Designer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Principais etapas da digestão anaeróbia.....	26
<b>Figura 2:</b> Esquema simples da técnica de fluxo contínuo e armazenamento.....	42
<b>Figura 3:</b> Sistema de pré-tratamento utilizado na pMethar. a) Etapa de triagem dos alimentos; b) vista geral do galpão de triagem; c) triturador; d) tanque de alimentação onde posteriormente ocorre a homogeneização. ....	48
<b>Figura 4:</b> Esquema de um digestor de lagoa coberta .....	49
<b>Figura 5:</b> Esquema do processo Laran .....	50
<b>Figura 6:</b> Biodigestor CSTR com gasômetro integrado e agitador de eixo longo .....	51
<b>Figura 7:</b> Esquema de um reator anaeróbio de fluxo ascendente.....	52
<b>Figura 8:</b> Estrutura de uma cúpula em dupla membrana .....	61
<b>Figura 9:</b> Esquema de um motor de combustão interna .....	65
<b>Figura 10:</b> Perfil temporal da demanda de refeições dos RUs nos últimos anos .....	68
<b>Figura 11:</b> Janela de seleção do modo operacional e disponibilidade anual da planta.....	73
<b>Figura 12:</b> Janela para inserção do balanço estequiométrico das reações .....	74
<b>Figura 13:</b> Janela para inserção dos parâmetros cinéticos .....	75
<b>Figura 14:</b> À esquerda janela de registro para substâncias puras. À direita janela de edição de propriedades. ....	78
<b>Figura 15:</b> Triturador .....	80
<b>Figura 16:</b> Tanque de alimentação/Mistura do digestor .....	80
<b>Figura 17:</b> Bomba de alimentação do Digestor.....	81
<b>Figura 18:</b> Digestor Anaeróbio .....	81
<b>Figura 19:</b> Janela de configuração das reações estequiométrica no digestor .....	82
<b>Figura 20:</b> Compressor .....	83
<b>Figura 21:</b> Etapa de refrigeração do biogás .....	83
<b>Figura 22:</b> Válvula do tipo gaveta.....	83
<b>Figura 23:</b> Misturador .....	84
<b>Figura 24:</b> Biofiltro percolador .....	84
<b>Figura 25:</b> Gasômetro de baixa pressão.....	85
<b>Figura 26:</b> Bomba de remoção do substrato .....	85
<b>Figura 27:</b> Tanque de armazenamento do digestato .....	85
<b>Figura 28:</b> Dados da corrente de alimentação do digestor.....	87
<b>Figura 29:</b> Parâmetros configurados no digestor.....	88
<b>Figura 30:</b> Janela acusando erro por ausência de fator para os materiais base do equipamento .....	92
<b>Figura 31:</b> Janela para configuração do preço do equipamento com a opção padrão Built in cost model. ....	93
<b>Figura 32:</b> Janela de configuração do capital direto, exibindo os diversos parâmetros utilizados e sua relação direta com o preço dos equipamentos .....	94
<b>Figura 33:</b> Parâmetros utilizados para o cálculo de custo de manutenção .....	96
<b>Figura 34:</b> Composição final do biogás pronto para uso .....	97
<b>Figura 35:</b> Motor de combustão interna sem cogeração de energia .....	98

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Variação do na concentração de amônia livre no limite de inibitório de nitrogênio amoniacal .....	33
<b>Tabela 2:</b> Variação do poder calorífico inferior de diversos gases combustíveis .....	38
<b>Tabela 4:</b> Caracterização química dos resíduos alimentares do RU .....	70
<b>Tabela 5:</b> Estimativa da geração de resíduos alimentares (kg/dia) .....	71
<b>Tabela 6:</b> Composição de saída do biogás bruto .....	90
<b>Tabela 7:</b> Composição de saída do digestato bruto .....	90
<b>Tabela 8:</b> Valores encontrados por Moura (2017) e o presente trabalho para uma planta de biogás a partir de resíduos alimentares do RU Central.....	91
<b>Tabela 9:</b> Investimento inicial para realização do projeto.....	92
<b>Tabela 10:</b> Relação de equipamentos utilizados na planta e preço de aquisição calculado pelo Built in model .....	93
<b>Tabela 11:</b> Custo anual total de operação .....	95
<b>Tabela 12:</b> Dados utilizados para a configuração dos parâmetros de custo operacional .....	95

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Composição dos RSU ao redor do mundo (%).....	24
<b>Quadro 2:</b> Principais espécies de microrganismos envolvidos nas etapas da digestão anaeróbia .....	30
<b>Quadro 3:</b> Composição do biogás em função da sua origem .....	37
<b>Quadro 4:</b> Componentes típicos do biogás e seus efeitos como impureza.....	38
<b>Quadro 5:</b> Especificações para o uso do biogás com seus principais contaminantes .....	53
<b>Quadro 6:</b> Substâncias puras utilizadas na simulação .....	78
<b>Quadro 7:</b> Continuação das substâncias puras utilizadas na simulação.....	79
<b>Quadro 8:</b> Misturas utilizadas na simulação .....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ABRELPE:** Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;

**ADM1:** Anaerobic Digestion Model n° 1;

**AGV:** Ácidos graxos voláteis;

**ANP:** Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis;

**CEGAS:** Companhia de Gás do Ceará;

**CIBiogas:** Centro Internacional de Energias Renováveis;

**C/N:** Relação Carbono/ Nitrogênio;

**CSTR:** Continuous Stirred Tank Reactor;

**CT:** Centro de Tecnologia;

**EPE:** Empresa de Pesquisas Energéticas;

**FEAM:** Fundação Estadual do Meio Ambiente;

**FORSU:** Fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos;

**GEE:** Gases de efeito estufa;

**GHG:** Greenhouse Gas;

**GLP:** Gás liquefeito de petróleo;

**GN:** Gás Natural;

**IFCS – IH:** Instituto de Filosofia e Ciências Sociais;

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Changes;

**MDL:** Mecanismo de desenvolvimento limpo;

**MRS:** Microrganismos redutores de sulfato;

**MSW:** Municipal solid waste;

**ONU:** Organização das Nações Unidas;

**PEAD:** Polietileno de alta densidade;

**pH:** Potencial hidrogeniônico;

**PLANSAB:** Plano Nacional de Saneamento Básico;

**PNRS:** Política Nacional de Resíduos Sólidos;

**PNSB:** Pesquisa Nacional de Saneamento Básico;

**PROBIOGAS:** Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil;

**PV:** Praia Vermelha;

**PVC:** Policloreto de vinila;

**RCE:** Redução Certificada de Emissões;  
**RSU:** Resíduos sólidos urbanos;  
**RU:** Restaurante Universitário;  
**SPD:** SuperPro Designer;  
**UASB:** Upflow Anaerobic Sludge Blanket;  
**UFRJ:** Universidade Federal do Rio de Janeiro.

## LISTA DE SÍMBOLOS

**atm:** Atmosfera;  
**COV:** Carga orgânica volumétrica;  
**\$:** Dólar;  
**g/L:** Grama por litro;  
**°C:** Graus celsius;  
**Mt:** Megatonelada;  
**MPa:** Megapascal;  
**MW:** Megawatts;  
**m<sup>3</sup>:** Metro cúbico;  
**m<sup>3</sup>/h:** Metro cúbico por hora;  
**mg/L:** Miligrama por litro;  
**mg/m<sup>3</sup>:** Miligramas por metro cúbico;  
**mol:** Mol ou mole;  
**mol/L:** Mol por litro;  
**Nm<sup>3</sup>:** Normal metro cúbico;  
**ppmv:** Parte por milhão em volume;  
**%:** Percentual;  
**PCI:** Poder calorífico inferior;  
**Kcal/mol:** Quilocaloria por mol;  
**kg/h:** Quilogramas por hora;  
**kgVS/m<sup>3</sup>:** Quilograma de sólidos voláteis por metro cúbico;  
**kJ/m<sup>3</sup>:** Quilojoule por metro cúbico;  
**kPa:** Quilopascal;  
**kW:** Quilowatts;  
**kW-h:** Quilowatts – hora;  
**kW/m<sup>3</sup>:** Quilowatts por metro cúbico;  
**R\$:** Reais;  
**ST:** Sólidos totais;  
**SV:** Sólidos voláteis;  
**TRH:** Tempo de residência hidráulica;  
**TRS:** Tempo de residência de sólidos;

**t/d:** tonelada por dia;

**bar:** Unidade de pressão;

**$\Delta H^\circ$ :** Variação de entalpia;

**vol.:** Volume.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS.....	22
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	24
2.1 TECNOLOGIAS DE VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS.....	24
2.1.1 <b>O processo de digestão anaeróbia</b> .....	26
2.1.1.1 Hidrólise.....	27
2.1.1.2 Acidogênese.....	27
2.1.1.3 Acetogênese.....	28
2.1.1.4 Metanogênese.....	28
2.1.1.5 Sulfetogênese.....	29
2.1.2 <b>Principais parâmetros da digestão anaeróbia</b> .....	30
2.1.2.1 Composição do substrato, nutrientes e relação carbono/nitrogênio.....	30
2.1.2.2 Potencial hidrogeniônico (pH) e a concentração de ácidos orgânicos.....	31
2.1.2.3 Inibidores.....	32
2.1.2.4 Parâmetros operacionais dos digestores.....	34
2.1.2.4.1 <i>Tempo de retenção</i> .....	34
2.1.2.4.2 <i>Carga orgânica volumétrica (COV)</i> .....	35
2.1.2.4.3 <i>Agitação</i> .....	36
2.2 O BIOGÁS.....	36
2.2.1 <b>Principais benefícios e aplicações</b> .....	38
2.3 ELABORAÇÃO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES.....	40
2.3.1 <b>Desenho do processo e escolhas operacionais</b> .....	40
2.3.1.1 Modo de condução.....	40
2.3.1.1.1 <i>Batelada ou descontínuo</i> .....	40
2.3.1.1.2 <i>Contínuo</i> .....	41
2.3.1.1.3 <i>Semicontínuo</i> .....	41
2.3.1.2 Temperatura.....	42
2.3.1.2.1 <i>Psicrófilos</i> .....	42



2.3.1.2.2 <i>Mesófilos</i> .....	43
2.3.1.2.3 <i>Termófilos</i> .....	43
2.3.1.3 Via operacional.....	44
2.3.1.3.1 <i>Via úmida</i> .....	44
2.3.1.3.2 <i>Via seca</i> .....	44
2.3.1.4 Número de fases/etapas.....	45
2.3.1.4.1 <i>Sistemas monofásicos</i> .....	45
2.3.1.4.2 <i>Sistemas bifásicos</i> .....	46
<b>2.3.2 Áreas de uma planta de biogás</b> .....	<b>46</b>
2.3.2.1 Pré tratamento.....	46
2.3.2.1.1 <i>Triagem</i> .....	46
2.3.2.1.2 <i>Separação</i> .....	47
2.3.2.1.3 <i>Pré-tratamento do substrato e homogeneização</i> .....	47
2.3.2.2 Área de Digestão Anaeróbia.....	48
2.3.2.2.1 <i>Digestores de fluxo pistonado</i> .....	49
2.3.2.2.2 <i>Mistura completa</i> .....	50
2.3.2.2.3 <i>Reatores anaeróbios de fluxo ascendente</i> .....	51
2.3.2.3 Pós tratamento do biogás.....	52
2.3.2.3.1 <i>Remoção da umidade</i> .....	53
2.3.2.3.1.1 <i>Absorção</i> .....	54
2.3.2.3.1.2 <i>Adsorção</i> .....	54
2.3.2.3.1.3 <i>Condensação</i> .....	55
2.3.2.3.2 <i>Remoção do H<sub>2</sub>S</i> .....	56
2.3.2.3.2.1 <i>Remoção por tratamentos biológicos</i> .....	56
2.3.2.3.2.2 <i>Remoção por adsorção</i> .....	57
2.3.2.3.2.3 <i>Remoção por absorção em quelato de ferro</i> .....	58
2.3.2.3.2.4 <i>Precipitação in situ com sais de ferro</i> .....	59
2.3.2.4 Armazenamento do biogás.....	59
2.3.2.4.1 <i>Gasômetros de baixa pressão</i> .....	59
2.3.2.4.1.1 <i>Gasômetro integrado</i> .....	60
2.3.2.4.1.2 <i>Gasômetro externo</i> .....	61
2.3.2.4.2 <i>Gasômetros de média/alta pressão</i> .....	61
2.3.2.5 Conversão e utilização do biogás.....	62

2.3.2.5.1 <i>Motores de combustão interna</i> .....	63
2.3.2.5.2 <i>Turbinas e microturbinas a gás</i> .....	65
2.3.2.5.3 <i>Turbinas a vapor</i> .....	66
2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS DA REVISÃO DA LITERATURA.....	67
3 <b>CENÁRIO DE ESTUDO</b> .....	68
4 <b>METODOLOGIA</b> .....	70
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DO SUBSTRATO.....	70
4.2 DEFINIÇÃO DO VOLUME DO REATOR E TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICA.....	71
4.3 SUPERPRO DESIGNER .....	72
4.3.1 <b>Etapas de simulação no SuperPro Designer</b> .....	72
4.3.1.1 Escolha do modo de operação.....	72
4.3.1.2 Seleção do modelo do processo.....	74
4.3.1.3 Registro de componentes e misturas.....	77
4.3.1.4 Seleção e configurações dos equipamentos e operações.....	79
4.3.1.4.1 <i>Triturador</i> .....	79
4.3.1.4.2 <i>Tanque de alimentação/mistura</i> .....	80
4.3.1.4.3 <i>Bomba de alimentação do digestor</i> .....	80
4.3.1.4.4 <i>Digestor</i> .....	81
4.3.1.4.5 <i>Compressor</i> .....	82
4.3.1.4.6 <i>Refrigeração</i> .....	83
4.3.1.4.7 <i>Válvula de alívio de pressão</i> .....	83
4.3.1.4.8 <i>Misturador/Biofiltro percolador</i> .....	84
4.3.1.4.9 <i>Gasômetro</i> .....	84
4.3.1.4.10 <i>Bomba de remoção do digestato</i> .....	85
4.3.1.4.11 <i>Tanque de armazenamento do digestato</i> .....	85
5 <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	86
5.1 CORRENTE INICIAL DE SUBSTRATO, VOLUME DO DIGESTOR E TRH DO PROCESSO.....	86
5.2 BALANÇO DOS MATERIAIS E CORRENTES.....	88
5.3 ANÁLISE DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	89
5.4 ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR.....	90
5.4.1 <b>Análise de custos</b> .....	91

5.4.2 Análise de benefícios e aplicações.....	96
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	101
REFERÊNCIAS.....	103
APÊNDICE I MODELO DE BIOCONVERSÃO ANAERÓBIA.....	109
APÊNDICE II BALANÇO MATERIAL E DAS CORRENTES.....	114
APÊNDICE III FLUXOGRAMA DO PROCESSO.....	120

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a evolução da ciência e a descoberta de novas tecnologias tem proporcionado verdadeiras revoluções à humanidade, causando modificações profundas desde a maneira como esta se organiza em sociedade, até sua interação com o restante do planeta. A melhoria nas condições e expectativa de vida aliadas à redução da taxa de mortalidade, elevaram a população a um número sem precedentes, passando de 2,6 bilhões de indivíduos em 1950 para uma estimativa de 7,7 bilhões nos dias atuais (UN Department of Economics and Social Affairs, 2019). Esse crescimento populacional desenfreado, todavia, traz impactos significativos na relação com o meio ambiente, na medida em que gera um aumento proporcional, tanto da demanda por novos recursos, como consequentemente, na sua degradação e geração de resíduos.

Segundo estudo publicado pelo *World Bank Group*, somente em 2018 foram gerados cerca de 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos nas cidades em todo o mundo, podendo esse número chegar a 3,4 bilhões de toneladas ainda em 2050 (KAZA *et al.*, 2018). A maior parte dessa quantia foi composta por materiais de origem orgânica. Resíduos alimentares, de jardinagem, madeira e papéis responderam juntos por mais de 66% do total a ser tratado, variando sua concentração de acordo com as características culturais, políticas e econômicas de cada região.

A problemática do crescimento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ou lixo, como é popularmente conhecido, acentua-se ainda mais nos países em desenvolvimento e subdesenvolvidos. Estes costumam corroborar com a deterioração do meio ambiente pela ausência de controle e políticas ambientais mais restritivas em prol de um crescimento econômico mais acelerado (SISIMO; OLIVEIRA, 2000 *apud* LANDIM; AZEVEDO, 2006), o que, somado a outras características, como a falta de investimento em saneamento básico e planejamento urbano, acabam contribuindo para o descarte e acúmulo de resíduos sólidos, sem nenhum tratamento, diretamente no ambiente, dando origem aos lixões nos grandes centros urbanos e periferia.

No Brasil, a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada em 2008 pelo IBGE, trouxe resultados preocupantes. De acordo o levantamento, mais da metade (50,8%) dos municípios tinham os vazadouros a céu aberto (lixões) como destino final de seus resíduos, enquanto 22,5% destinavam à aterros controlados e somente 27,7% enviavam seus resíduos à aterros sanitários (IBGE, 2010). Como o próprio nome indica, os vazadouros a céu aberto, consistem em depósitos de lixo ao ar livre, sem nenhuma medida de proteção, permitindo a

proliferação de vetores que disseminam doenças, além da manutenção dos catadores de lixo, muitos dos quais crianças, expostos a uma série de riscos, mas que têm no lixo sua principal fonte de alimentação e subsistência. Os aterros controlados, apesar de minimizarem alguns problemas ao encobrirem o lixo, ainda assim geram impactos ambientais graves, já que diferentemente dos aterros sanitários, a maioria não possui infraestrutura adequada para impermeabilização do solo ou coleta e tratamento do lixiviado e metano produzidos durante a degradação da matéria orgânica. Dessa forma, há contaminação do solo e das águas subterrâneas pelo lixiviado, bem como risco de explosões e a poluição do ar pela emissão livre de metano. (LANDIM; AZEVEDO, 2006; RAJARAM; SIDDIQUI; KHAN, 2011). Por fim, mesmo os aterros sanitários, apesar de serem considerados uma alternativa correta, apresentam suas limitações, como tempo de vida útil e a necessidade de uma grande área para sua implementação, cada vez mais escassas nos grandes centros urbanos.

Com o objetivo de superar estes desafios e reverter o cenário, foi promulgada em 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Como marco regulatório, a legislação estabeleceu uma série de princípios, diretrizes e instrumentos visando uma gestão integrada dos resíduos sólidos calcada nos pilares do desenvolvimento sustentável e ecoeficiência. Uma de suas grandes contribuições foi a distinção entre resíduos e rejeitos, considerando-se rejeitos aqueles resíduos sólidos que após esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação pelas tecnologias disponíveis e economicamente viáveis, apresentam como única solução adequada sua disposição final em aterros sanitários (BRASIL, 2010). Essa distinção se tornou relevante por criar a obrigação de destinação dos resíduos sólidos, via técnicas e processos que visem além do seu tratamento, máxima valorização antes de sua eliminação em aterros sanitários sob a forma de rejeitos, como por exemplo, a recuperação energética via tratamento por digestão anaeróbia e aproveitamento do biogás (ABRELPE, 2015).

As tecnologias de digestão anaeróbia são capazes de simular dentro de um digestor este processo natural que ocorre em ambientes como pântanos e aterros de RSU, onde a ausência de oxigênio e abundância de matéria orgânica, propiciam a proliferação de um consórcio de microrganismos responsáveis por transformar esses resíduos em biogás e matéria orgânica estabilizada, chamada também de digestato ou biofertilizante (ALVES, V., 2016). Como técnica de estabilização da fração orgânica de resíduos sólidos, é uma das mais conhecidas e considerada a menos agressiva ao meio ambiente (SUH; ROUSSAUX, 2002, *apud* KUMAR, 2012) apresentando vantagens como a redução de até 50% da massa seca de resíduos, redução de patógenos e principalmente a produção do biogás, um gás que devido ao grande percentual

de metano em sua composição apresenta valor energético podendo ser reaproveitado de inúmeras formas (KUMAR, 2012; CIBIOGÁS, 2020a).

O uso das tecnologias de digestão anaeróbia como uma alternativa ao tratamento de RSU por aterramento no país, chama ainda mais atenção quando se analisa a composição do lixo brasileiro. De acordo com levantamento realizado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2019), cerca de 53,5% de todo resíduo descartado é composto por restos alimentares, 17,6% por papéis e derivados, 17,5% por plásticos, enquanto os 11,8% restantes são formados por metais, vidro e outros materiais. Há, portanto, uma enorme oferta de resíduos orgânicos que podem ser tratados e reaproveitados energeticamente, destacando-se os resíduos alimentares, que devido a sua ótima biodegradabilidade são capazes de gerar até 0,67m<sup>3</sup> de metano por kg de sólidos voláteis quando tratados separadamente (ALVES, I. 2016).

Apesar de todo este potencial e de mais de uma década desde a instituição da PNRS, poucas mudanças foram feitas na prática para se buscar alternativas sustentáveis ao tratamento dos RSU, existindo algumas poucas iniciativas isoladas, como a Usina de biometanização do Caju, na cidade do Rio de Janeiro; a plataforma de metanização de resíduos, na Universidade Federal de Minas Gerais; e a Unidade de demonstração de Itaipu em Foz do Iguaçu, todas utilizando tecnologias de digestão anaeróbia para o tratamento de resíduos alimentares (FERREIRA, 2015; FERREIRA *et al.*, 2019; SMANIOTTO, 2020) A pouca evolução fica ainda mais nítida quando se compara o cenário reportado pela última PNSB com o encontrado nos dias atuais. Se na década passada 25 milhões de toneladas de resíduos eram dispostos de maneira inadequada em aterros controlados e lixões, no ano passado esse número foi de 29 milhões de toneladas, representando cerca de 40,5% de todo lixo destinado (ABRELPE, 2020).

Diante dessa necessidade de maior conscientização, as universidades desempenham um papel importante, já que são responsáveis pela disseminação de conhecimento e formação não só de profissionais como cidadãos, devendo cumprir de modo consciente as políticas públicas e servir de exemplo. Na Universidade Federal do Rio Janeiro (UFRJ), desde 2017 geram-se pelo menos 285 toneladas anuais de resíduos orgânicos no restaurante universitário central que atualmente são apenas destinados ao aterro sanitário, desperdiçando seu potencial energético, além de onerar a universidade com os custos envolvidos na sua disposição (MOURA, 2017).

Neste sentido, buscando fortalecer a disseminação de alternativas sustentáveis para o tratamento de RSU, o presente trabalho pretende conceber e analisar um projeto de planta de biogás a partir dos resíduos alimentares do restaurante universitário central da UFRJ,

contribuindo não só como uma base para a realização de novos estudos nesta área como também para um planeta ecologicamente mais equilibrado e saudável.

## 1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O presente trabalho teve como objetivo geral projetar uma planta de biogás para o aproveitamento energético dos resíduos alimentares gerados pelo RU Central da UFRJ.

De forma a nortear o seu desenvolvimento, os seguintes objetivos específicos foram previamente definidos:

- ❖ Revisão dos principais equipamentos e operações numa planta de biogás;
- ❖ Aprendizado do funcionamento do simulador Super Pro Designer;
- ❖ Desenho e esquematização de um processo de produção de biogás a partir de resíduos alimentares;
- ❖ Avaliação preliminar dos custos envolvidos bem como os potenciais benefícios e aplicações.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para melhor apresentação do seu conteúdo, o corpo deste estudo foi dividido em seis capítulos:

No capítulo 1 “INTRODUÇÃO”, são apresentados o tema principal do trabalho, seus objetivos, gerais e específicos, bem como a estrutura organizacional que o compõe.

Já o capítulo 2 “REVISÃO DA LITERATURA” divide-se em três grandes partes; “Tecnologias de valorização da matéria orgânica”; “o biogás” e “Elaboração de uma planta de biogás a partir de resíduos alimentares”. A primeira parte é focada no processo de origem do biogás, a digestão anaeróbia, sendo apresentados o seu mecanismo e principais parâmetros de influência. Em seguida, são comentadas as características e benefícios do uso biogás, encerrando-se o capítulo com um levantamento dos principais elementos necessários para a elaboração de uma planta com vistas ao seu aproveitamento energético.

O capítulo 3 “CENÁRIO DE ESTUDO” resume-se a uma breve apresentação do restaurante universitário central da UFRJ, enquanto que o capítulo 4 “METODOLOGIA” traz a abordagem geral utilizada para a montagem e simulação da planta, incluindo o levantamento e as fórmulas para o cálculo de alguns dados necessários.

No capítulo 5 “RESULTADOS E DISCUSSÕES” é feita uma análise de todo o processo de simulação desenvolvido, exibindo-se os principais resultados obtidos, além da realização de

uma avaliação preliminar dos custos envolvidos na implantação do projeto bem como seus potenciais benefícios e aplicações.

O encerramento do trabalho se dá no capítulo 6 e 7, respectivamente “CONSIDERAÇÕES FINAIS” e “RECOMENDAÇÕES”, onde são realizadas uma avaliação geral do trabalho apontando os principais resultados conquistados e sugestões de melhoria visando futuros trabalhos com o simulador relacionados a este tema.

Finalmente, o estudo ainda traz nos elementos pós-textuais, todas as referências que embasaram a sua escrita, mais a inclusão de três apêndices: APÊNDICE I – MODELO DE BIOCONVERSÃO ANAERÓBIA; APÊNDICE II – BALANÇO MATERIAL E DAS CORRENTES e APÊNDICE III – FLUXOGRAMA DO PROCESSO.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo é abordado o estado da arte da produção de biogás. Primeiramente foi dado um enfoque na digestão anaeróbia, processo bioquímico que dá origem ao biogás, preocupando-se em explicá-la de forma simples, porém completa, incluindo não só suas etapas reacionais como também os principais fatores que afetam o seu desenvolvimento. Seguiu-se então para o tema do trabalho, o biogás, onde foram detalhadas sua composição, características e benefícios do aproveitamento.

Por fim, foram abordados os principais elementos presentes na construção e operação de uma planta de biogás a partir de resíduos alimentares. Neste sentido, optou-se por fazer uma revisão desde as tomadas de decisões envolvidas na concepção da planta, até as técnicas e tecnologias mais utilizadas em cada etapa do processo produtivo, buscando-se fornecer todos subsídios necessários para sua elaboração, objetivo do presente trabalho.

### 2.1 TECNOLOGIAS DE VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS

Os resíduos orgânicos correspondem hoje a maior parte do lixo produzido no planeta (IPCC, 2019), sendo também a maior fonte dos problemas relacionados à disposição dos resíduos sólidos urbanos. Sua decomposição seja em lixões ou aterros, gera lixiviado que contamina o solo e águas subterrâneas; emite biogás com alto conteúdo de metano, trazendo riscos de explosões e agravando o efeito estufa; além de favorecer a manutenção dos catadores de lixo e disseminação doenças (BRASIL, 2019). Não à toa, novas formas de tratamento mais sustentáveis vêm sendo discutidas para estes resíduos, destacando-se a sua valorização por meio da compostagem e das tecnologias de digestão anaeróbia. O Quadro 1 lista a composição dos RSU no Brasil e no mundo.

**Quadro 1:** Composição dos RSU ao redor do mundo (%)

Região	Restos de Alimentos	Papel e Derivados	Plásticos	Metal	Vidro	Outros
Brasil	53,5	17,6	17,5	2,2	4	5,2
América do Sul	54,1	12,4	13,7	2	3	14,8
América Central	62,7	12,6	10,3	2,7	3,3	8,4
América do Norte	20,2	23,3	15,8	6,4	4,2	30,1
Europa	32,8	17,4	11	1,4	2,8	34,6
África	50,3	13,1	15,5	4,4	4,2	12,5
Ásia	57,1	20,2	12,3	2,8	4,7	2,9
Oceania	25,9	12	8,3	1,8	2,8	49,2
Mundo	50,3	13,1	12,3	2,7	3,3	18,3

Fonte: IPCC (2019)

Segundo o Plano Nacional de Saneamento Básico, a compostagem pode ser definida como um método aeróbio de reciclagem e tratamento de resíduos orgânicos, onde é feito um controle de parâmetros como aeração e temperatura, de forma a acelerar a degradação natural da matéria orgânica realizada pelos macros e microrganismos (BRASIL, 2019). Nesse processo o resíduo sólido orgânico é transformado em um composto estabilizado, rico em nutrientes e livre de patógenos que pode ser comercializado como insumo agrícola devido as suas características fertilizantes. Além disso devido às suas condições operacionais não há produção de metano nem percolação de lixiviado tornando o processo isento de impactos ambientais (FERNANDES; DA SILVA, 1999).

Já o uso das tecnologias de digestão anaeróbia, no caso dos RSU, consiste em nada mais do que a reprodução dos processos que já ocorrem no aterro dentro de um ambiente controlado, chamado de digestor, biodigestor ou reator anaeróbio. Dessa forma, ao contrário do que ocorre nos aterros e lixões, não há percolação de lixiviado, mas sim a formação de um lodo estabilizado, o digestato, que semelhante ao composto pode ser comercializado. Em relação ao biogás gerado, este é armazenado e pode ser utilizado na geração de calor ou energia elétrica, destruindo o metano que antes seria emitido livremente na atmosfera (MOURA, 2017).

De um modo geral, ambas as alternativas de valorização de resíduos orgânicos são interessantes, na medida em que garantem o tratamento adequado da matéria orgânica sem incorrerem em impactos negativos, porém, algumas diferenças devem ser observadas na decisão pela melhor escolha (MOURA, 2017).

Embora a compostagem geralmente seja um processo mais barato que a digestão anaeróbia, seu tempo gira em torno de 3 meses, necessitando de várias unidades para suprir a demanda de resíduos enquanto que a digestão anaeróbia normalmente tem um tempo de duração variando de dias até pouco mais de um mês. Além disso, nem todos os resíduos orgânicos são indicados para a composteira. Há limites para alguns alimentos, para maioria de tipos de papéis, entre outros resíduos orgânicos o que acaba reduzindo sua abrangência de aplicação, fato que não ocorre com os digestores anaeróbios (VG RESÍDUOS, 2019).

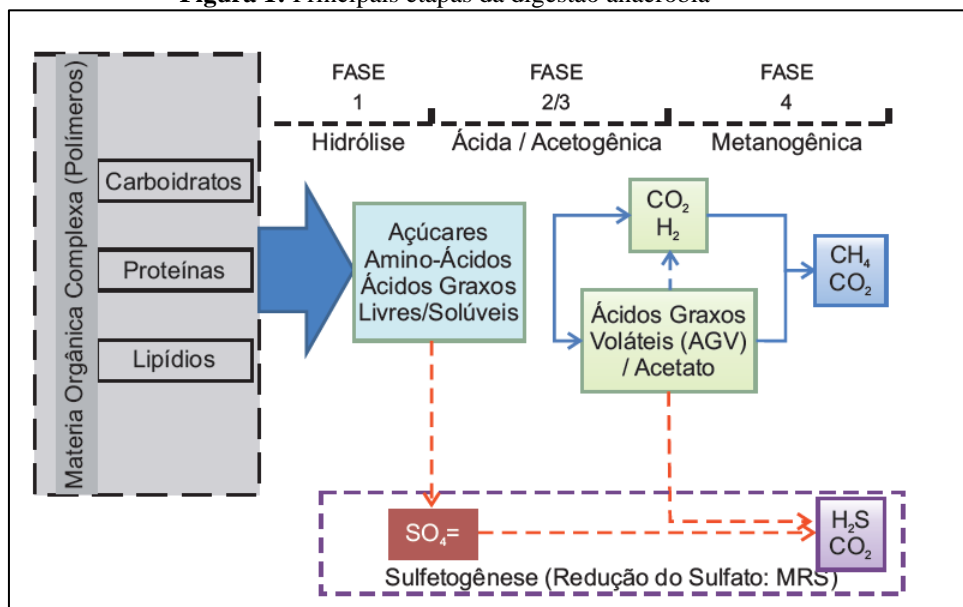
Finalmente, a possibilidade adicional de aproveitamento energético do biogás, torna geralmente a digestão anaeróbia uma opção mais apreciada frente a compostagem, o que junto com outras vantagens mencionadas, ampliam a sua escolha como opção cada vez mais usada no tratamento de resíduos orgânicos (MOURA, 2017).

### 2.1.1 O processo de digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia, também chamada de biodigestão, pode ser definida como um processo metabólico complexo, no qual a matéria orgânica é convertida em biogás e digestato, por meio da sintrofia de um consórcio de microrganismos em anaerobiose (KUNZ *et al.*, 2019; CIBIOGÁS, 2020). É um processo natural, ocorrendo diariamente em diversos ambientes que propiciam as condições necessárias para o seu desenvolvimento, desde selvagens, como pântanos e fossas marinhas, à antrópicos, como aterros sanitários e arrozais (MARIANI, 2018; ALVES, I., 2016).

Concebida no início do século XX como um processo em duas etapas (DENG *et al.*, 2020), atualmente acredita-se que a digestão anaeróbica possa ser dividida em quatro grandes etapas reacionais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, como ilustra a Figura 1, com alguns autores destacando também a presença da sulfetogênese como uma etapa reacional, em certas situações, competitiva à metanogênese (CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014). Cada etapa, por sua vez, é regida por um grupo diferente de microrganismos que possuem especificidades ambientais e metabólicas próprias, tornando fundamental o conhecimento do ecossistema microbiológico e sua interação para a manutenção do equilíbrio e otimização do processo (KUNZ *et al.*, 2019).

**Figura 1:** Principais etapas da digestão anaeróbia



**Fonte:** CASSINI; COELHO; PECOARA (2014)

#### 2.1.1.1 Hidrólise

Esta primeira etapa é efetuada por bactérias que secretam exoenzimas como proteases, lipases e amilases para catalisar a hidrólise de moléculas orgânicas complexas (polímeros) em compostos mais simples e solúveis (monômeros). Assim, macromoléculas insolúveis como carboidratos, lipídeos e proteínas são convertidas em açúcares, ácidos graxos e aminoácidos que conseguem atravessar a membrana celular e são assimilados pelos microrganismos (KERROUM; MOSSAB; HASSEN, 2012; CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014; DENG *et al.*, 2020).

Geralmente essa etapa é considerada a limitante na cinética global da reação e sua taxa reacional varia de acordo com o substrato<sup>1</sup>, com os carboidratos sendo hidrolisados em poucas horas, enquanto lipídeos e proteínas necessitam de alguns dias. Já quando há lignina na composição a reação se dá muito lentamente e geralmente de forma incompleta (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; KUNZ *et al.*, 2019; VAN *et al.*, 2020).

Por fim, Deng e colaboradores (2020) observam que é nessa etapa que o oxigênio (O<sub>2</sub>) dissolvido na água (H<sub>2</sub>O) é consumindo pelas espécies facultativas favorecendo o crescimento das anaeróbias estritas.

#### 2.1.1.2 Acidogênese

Na acidogênese, bactérias acidogênicas metabolizam os monômeros resultantes da etapa de hidrólise gerando principalmente ácidos orgânicos de cadeia curta, conhecidos como ácidos graxos voláteis (AGV), tais como o ácido acético, propiônico e butírico. A predominância de cada substância depende de diversos fatores, porém a concentração de hidrogênio (H<sub>2</sub>) no meio é apontada como um dos mais influentes, já que altas pressões H<sub>2</sub> favorecem a formação de produtos com maior quantidade de carbono (C). Vale destacar ainda que além dos ácidos graxos voláteis, outros compostos como álcoois, amônia (NH<sub>3</sub>), sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ácido láctico e H<sub>2</sub> também são produzidos (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; KERROUM; MOSSAB; HASSEN, 2012; CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014; KUNZ *et.al.*, 2019; DENG *et. al.*, 2020).

---

<sup>1</sup> Apesar de, por definição, substrato ser a molécula que sofre a transformação metabólica no processo, como as publicações no tema tratam substrato como o material que será processado, no presente trabalho será adotada a mesma terminologia da literatura especializada em biogás

### 2.1.1.3 Acetogênese

A terceira etapa, acetogênese, é onde ocorre a geração da maior parte das moléculas que servirão de substrato para as arqueas metanogênicas, sendo executada por dois grupos de microrganismos estritamente anaeróbios, as bactérias acetogênicas produtoras de H<sub>2</sub> e as bactérias homoacéticas (CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014; VAN *et al.*, 2020; KUNZ *et al.*, 2019; DENG *et al.*, 2020)

As bactérias acetogênicas produtoras de H<sub>2</sub> são as responsáveis por converter os compostos orgânicos produzidos durante a acidogênese em H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e acetato (CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014). Estas reações, no entanto, são endotérmicas, e só ocorrem sob uma condição bem específica. Tanto Kunz e colaboradores (2019) quanto Deng e colaboradores (2020) apontam que para estas reações serem termodinamicamente favoráveis, a pressão de H<sub>2</sub> deve ser mantida a níveis extremamente baixos, com o H<sub>2</sub> produzido sendo prontamente consumido, o que é possível em grande parte graças a ação das arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, ressaltando a necessidade dessa simbiose.

Já as bactérias homoacéticas, possuem a capacidade de tanto utilizarem H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> para produção de ácido acético, liberando energia durante o processo, quanto realizarem o caminho reverso. Como ambos os caminhos reduzem a pressão parcial de H<sub>2</sub> e produzem substrato que serão posteriormente assimilados pelas metanogênicas, este grupo exercendo um papel importante no equilíbrio de toda a etapa. (KUNZ *et al.*, 2019; DENG *et al.*, 2020)

### 2.1.1.4 Metanogênese

Finalmente, a última etapa da digestão anaeróbia consiste na produção de metano (CH<sub>4</sub>) por meio da ação das arqueas metanogênicas. Esses microrganismos podem gerar CH<sub>4</sub> a partir de compostos que contenham 1 a 2 C em sua composição, porém normalmente são divididos em dois grupos, arqueas metanogênicas hidrogenotróficas e arqueas metanogênicas acetoclásticas. (DENG *et al.*, 2020; KERROUM; MOSSAB; HASSEN, 2012)

As arqueas metanogênicas hidrogenotróficas tem como rota metabólica a produção de CH<sub>4</sub> a partir do CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Dentre as metanogênicas são as que se desenvolve mais rápido embora seu crescimento ainda seja lento quando comparado com o observado para os microrganismos das outras etapas (VAN *et al.*, 2020). São responsáveis também por regular a formação dos AGV já que impactam diretamente na concentração de H<sub>2</sub>. (CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014; KUNZ *et al.*, 2019)

As arqueas metanogênicas acetoclásticas utilizam um mecanismo diferente e produzem CH<sub>4</sub> a partir da assimilação do acetato. Segundo Cassini, Coelho e Pecoara (2014), sua taxa de produção impacta diretamente no potencial hidrogeniônico (pH) do meio, já que são responsáveis pelo consumo de ácido acético e produção de CO<sub>2</sub>.

Ainda em relação às arqueas metanogênicas, diversos autores relatam uma maior taxa presença ou contribuição das acetoclásticas para produção de CH<sub>4</sub> em relação às hidrogenotróficas, geralmente 70/30% (CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014; ALVES, I., 2016; AKUNNA, 2018; KERROUM; MOSSAB; HASSEN, 2012), entretanto, Kunz e colaboradores (2019) observam que estudos recentes têm trazido uma nova ótica para a dinâmica desta relação, com situações onde há ausência ou baixa concentração de acetoclásticas devido a sua maior sensibilidade a fatores inibitórios e consequente predomínio das hidrogenotróficas na produção de CH<sub>4</sub>.

De fato, as arqueas metanogênicas, de modo geral, são extremamente sensíveis ao meio, sendo afetadas negativamente em caso de pequenas flutuações no pH, presença de O<sub>2</sub> acima de 0,1 mg/L e altas concentrações de AGV, superiores à 2.500 mg/L de ácido acético (PROBIOGAS, 2010; VAN *et al.*, 2020).

#### 2.1.1.5 Sulfetogênese

Como dito anteriormente, alguns autores também destacam a sulfetogênese como uma etapa reacional embora caiba esclarecer que ela não é considerada como parte componente da digestão anaeróbia propriamente dita. Sua importância ocorre somente quando o meio contém concentrações significativas do íon sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Nessas circunstâncias, os microrganismos redutores de sulfato (MRS) atuam oxidando compostos orgânicos, principalmente o acetato, gerando H<sub>2</sub>S e competindo ativamente com as arqueas metanogênicas, o que consequentemente inibe a produção de CH<sub>4</sub>. A presença de H<sub>2</sub>S pode levar ainda a precipitação de microelementos essenciais para a manutenção do metabolismo destas bactérias, além de ser prejudicial em concentrações acima de 160mg-S/L (DENG *et al.*, 2020; CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014; ALVES, I., 2016; VAN *et al.*, 2020).

**Quadro 2:** Principais espécies de microrganismos envolvidos nas etapas da digestão anaeróbia

Etapa	Microrganismos
Hidrólise	<i>Acetovibrio, Bacillus, Butyrivibrio, Clostridium, Eubacterium, Micrococcus, Lactabacillus, Peptococcus, Proteus vulgaris, Ruminococcus, Staphylococcus, Streptococcus, etc.</i>
Acidogênese	<i>Bacillus, Butyrivibrio, Clostridium, Eubacterium, Desulfobacter, Desulforomonas, Desulfovibrio, Lactabacillus, Pelobacter, Pseudomonas, Sarcina, Staphylococcus, Selenomonas, Streptococcus, Veillonella, etc.</i>
Acetogênese	<i>Methanobacillus omelionskii, Clostridium, Syntrophomonas buswelii, Syntrophomonas wolfei, Syntrophomonas wolinii, etc</i>
Metanogênese	<i>Metanogênicas acetoclásticas: Methanosaeta, Methanosarcina, etc. Metanogênicas hidrogenotróficas: Methanobacterium, Methanobrevibacter, Methanoplanus, Methanospirillum, etc.</i>
Sulfetogênese	<i>Desulfovibrio, Desulforomonas, Desulfobacter, Desulfosarcina</i>

**Fonte:** Adaptado de AKUNNA (2018); DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008)

## 2.1.2 Principais parâmetros da digestão anaeróbia

### 2.1.2.1 Composição do substrato, nutrientes e relação carbono/nitrogênio

Não obstante a principal fonte de energia na digestão anaeróbia serem os compostos orgânicos, a concentração e disponibilidade de macro e micronutrientes no meio também são essenciais para a manutenção das atividades metabólicas dos microrganismos. Macroelementos como nitrogênio (N) e enxofre (S) fazem parte da composição de novas células e aminoácidos enquanto que o fósforo (P) participa no transporte de energia intracelular por meio das moléculas de adenosina trifosfato (ATP) e nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato (NAPD) (MATA-ALVAREZ, 2003; PROBIOGAS, 2010).

Em relação aos microelementos, manganês (Mn) e ferro (Fe) são importantes no transporte de elétrons e ação enzimática, zinco (Zn) e cobre (Cu) são essenciais às bactérias hidrolíticas, enquanto que cobalto (Co), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e selênio (Se) são requisitados pelas arqueas metanogênicas como componentes estruturais para formação de vitaminas e fatores exclusivos. (DROSG; BRAUN; BOCHMANN, 2013; PROBIOGAS, 2010; DENG *et al.*, 2020)

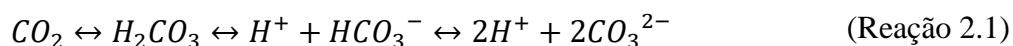
Muito embora também sejam requisitos nutricionais para o desenvolvimento do consórcio microbiano, a composição dos substratos influencia principalmente a velocidade da reação. Devido às suas diferentes velocidades de degradação, o teor de carboidratos, lipídeos e

proteínas impacta na produção dos intermediários limitando a sua produção ou mesmo inibindo no caso de acúmulo de determinadas substâncias. Além disso, a presença de compostos com estruturas mais complexas e menos digeríveis como os de composição lignocelulósica em sistemas produtores de biogás aumentam o tempo de residência nos reatores e o custo, requerendo etapas de pré-tratamento para se tornarem mais degradáveis. (GRANDO, 2017; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008)

Por fim, a relação carbono/nitrogênio (C/N) nos substratos também deve ser observada. Como citado, o nitrogênio é um elemento essencial na formação de novas células e enzimas, portanto uma relação C/N muito alta indica uma baixa degradabilidade e conseqüente redução na produção de metano, na medida em que haverá muito carbono para ser metabolizado, mas poucos microrganismos e enzimas para fazê-lo. Por outro lado, uma baixa relação C/N pode levar há uma alta concentração de NH<sub>3</sub> livre capaz de inibir as atividades microbianas mesmo em baixas concentrações. Não há um verdadeiro consenso em qual é a melhor proporção, porém os valores recomendando variam em torno de 10 a 30:1 (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; PROBIOGAS, 2010; CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014; ZHANG *et al.*, 2014).

#### 2.1.2.2 Potencial hidrogeniônico (pH) e a concentração de ácidos orgânicos

O valor e estabilidade do pH são extremamente importantes para o desempenho ótimo da digestão anaeróbia, uma vez que cada grupo de microrganismo e conseqüentemente cada etapa reacional possuem sua faixa de atuação. O controle dessa estabilidade geralmente é realizado por dois mecanismos em equilíbrio que mantém o efeito tampão, como mostram Deublein e Steinhauser (2008) nas reações 2.1, 2.2 e 2.3.



O equilíbrio entre CO<sub>2</sub>, bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) evitam que o pH decresça a valores muito baixos, enquanto que altos valores de pH são evitados pelo equilíbrio entre NH<sub>3</sub> e o íon amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Esses sistemas, no entanto, podem ser alterados por oscilações na temperatura, concentração de substâncias tóxicas e carga orgânica (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).



Segundo Kunz e colaboradores (2019), a maioria dos problemas relacionados ao pH no processo de biodigestão são em decorrência do acúmulo dos ácidos AGV. As bactérias fermentativas hidrolíticas e acidogênicas possuem uma faixa de pH ótima em torno de 5,2 a 6,3, porém esses microrganismos são robustos, frente à faixa de pH, atuando em valores desde 4,0 a 8,5. O mesmo não se pode dizer das arqueas metanogênicas que possuem atividade em uma faixa de pH relativamente restrita, entre 6,5 e 8. Se por algum motivo houver aumento na carga orgânica em pouco tempo, isso desestabiliza o sistema, gerando um acúmulo de AGV, o que por sua vez, reduz o pH acarretando na diminuição da atividade das arqueas metanogênicas, mais sensíveis. Como além de consumir acetato e, conseqüentemente regulando sua concentração no sistema e o consumo de outros ácidos na acetogênese, algumas espécies de arqueas metanogênicas também auxiliam nos mecanismos de tamponamento ao produzirem  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{HCO}_3^-$ , a redução das atividades destas arqueas gera mais acúmulo de ácidos, diminuindo ainda mais o pH, levando à falha completa dos mecanismos de tamponamento e inibindo de vez as etapas de acetogênese e metanogênese. (PROBIOGAS, 2010; KUNZ *et al.*, 2019; DENG *et al.*, 2020).

É importante portanto manter o pH sempre em torno de um valor na faixa da neutralidade (6,8 a 7,2), principalmente em sistemas controlados que visam à produção de  $\text{CH}_4$ , garantindo assim a plena atividade de todos os diferentes microrganismos (MARTINS, 2018).

### 2.1.2.3 Inibidores

Diversos fatores podem provocar a inibição das atividades microbianas na digestão anaeróbia. Uma das causas mais comuns é a inibição devido ao aumento da concentração de determinada substância no meio, seja por sua toxicidade para a microbiota, como nos casos do  $\text{O}_2$  e metais pesados (Zn, Cu, Ni...), seja por influenciarem negativamente o processo. Dentre estas substâncias destacam-se os compostos de enxofre (sulfetos e sulfatos) e o nitrogênio amoniacal, na forma de  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$  (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; DROSG; BRAUN; BOCHMANN, 2013; DENG *et al.*, 2020)

O nitrogênio amoniacal está presente na digestão anaeróbia devido à degradação de compostos ricos em nitrogênio como as proteínas, podendo ser encontrados na forma de  $\text{NH}_3$  livre (aquoso) ou do íon  $\text{NH}_4^+$ . Essas substâncias desempenham um papel importante no controle de pH do meio sendo um dos mecanismos de tamponamento, entretanto, o aumento de suas concentrações é altamente tóxico aos microrganismos, principalmente a de  $\text{NH}_3$  livre por sua capacidade de permear a membrana celular (ZHANG *et. al.*, 2014; DEUBLEIN;

STEINHAUSER, 2008; DROSG; BRAUN; BOCHMANN, 2013). Segundo Deng e colaboradores (2020) e Probiogas (2010), a NH<sub>3</sub> livre pode inibir a digestão anaeróbia mesmo a concentrações de 80 mg/L sendo este efeito também esperado quando a concentração total de nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) se encontra acima de 3 g/L. Ainda segundo os autores, apesar de em baixas concentrações o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ser uma fonte de nitrogênio para os microrganismos, acima de 3000 mg/L ele passa a ser letal para os mesmos.

É importante ressaltar também que a concentração desses compostos está associada tanto ao pH quanto a temperatura. À medida que a temperatura aumenta, aumenta-se também a concentração de NH<sub>3</sub> livre no meio e assim também ocorre com o pH. Isso pode ser explicado pelo fato de a NH<sub>3</sub> livre geralmente se encontra em equilíbrio com o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> devido ao mecanismo de tamponamento, porém se a concentração de íons OH<sup>-</sup> se elevar com o aumento do pH o equilíbrio se desloca para a produção de NH<sub>3</sub> (PROBIOGAS, 2010). A literatura indica que a variação do pH de 6,5 para 8, por exemplo, resulta no aumento de 30 vezes da concentração de amônia livre no meio (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; MARTINS, 2018; DENG *et al*, 2020)

A inibição por NH<sub>3</sub> é um grande problema em sistemas de produção de biogás a partir de resíduos alimentares, naturalmente ricos em proteínas. Para evitar que isto ocorra, algumas técnicas são aplicadas para diminuir sua concentração no reator, entre elas, a diluição do substrato com água, codigestão com substratos com alta relação C/N ou *stripping* do gás (BANKS *et al.*, 2018). A Tabela 1 traz os valores de NH<sub>3</sub> livre reportados por Kunz *et al.* (2019) em condições típicas de produção do biogás em biodigestores.

**Tabela 1:** Variação do na concentração de amônia livre no limite de inibitório de nitrogênio amoniacal

N-NH <sub>3</sub> (mg/L)	pH do meio	Temperatura (°C)	AL (mg/L)
3000	5	20	0,14
3000	7	20	14,34
3000	9	20	1031,68
3000	5	37	0,47
3000	7	37	46,58
3000	9	37	2055,77
3000	5	55	0,15
3000	7	55	139,51
3000	9	55	2911,66

Fonte: KUNZ *et al.*, (2019)

O enxofre por sua vez, assim como o nitrogênio exerce um papel importante na síntese celular, porém em altas concentrações possui efeito deletério na digestão anaeróbia. O enxofre está presente no meio principalmente nas formas de  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}_2\text{S}$  e como visto na sulfetogênese pode competir ativamente com as arqueas metanogênicas (DROSG; BRAUN; BOCHMANN, 2013; DENG *et al.*, 2020). Ademais, esses compostos são tóxicos aos microrganismos. Deng e colaboradores (2020) afirmam que a presença de sulfato acima de 5000mg/L inibe a atividade da microbiota, enquanto que Deublein e Steinhauser (2008) sugerem que a inibição pela presença de sulfeto de hidrogênio ocorre já em concentrações em torno de 50mg/L.

De fato, entre os compostos de enxofre, a presença de  $\text{H}_2\text{S}$  é a mais preocupante. Além de sua toxicidade mesmo em baixas concentrações, este composto também reage com outros compostos liberando o íon sulfeto ( $\text{S}^{2-}$ ) que por sua vez reage com os íons metálicos precipitando-os, diminuindo assim a disponibilidade de importantes micronutrientes para os microrganismos. (PROBIOGAS, 2010; DROSG; BRAUN; BOCHMANN, 2013). Ainda, este gás é extremamente tóxico aos seres humanos e corrosivo às tubulações e máquinas, e mesmo em pequenas quantidades, sua presença no biogás demanda gastos com purificação para que este possa ser posteriormente aproveitado (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; SANTOS; JOPERT, 2018).

#### 2.1.2.4 Parâmetros operacionais dos digestores

##### 2.1.2.4.1 Tempo de retenção

O tempo de retenção é definido como o tempo necessário para que a matéria orgânica em contato com os microrganismos seja completamente digerida ou atinja o valor desejado, sendo influenciado principalmente pela composição do substrato e temperatura do processo. O tempo de retenção é fundamental para o projeto de uma planta de biogás e pode ser avaliado de duas formas: tempo de retenção hidráulico e tempo de retenção de sólidos (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2012; TABATABAEI *et al.*, 2018).

O tempo de retenção hidráulico (TRH) é essencial para o cálculo do volume do digestor e compreende o tempo entre a entrada e saída do substrato, ou seja, o tempo em que o substrato está disponível para a digestão. Baixos valores de TRH podem levar ao fenômeno chamado de “curto-circuito”, onde uma fração do substrato sai do digestor sem ter sido completamente degradada enquanto que altos valores de TRH reduzem a produção biogás devido à baixa disponibilidade de nutrientes uma vez que o substrato inicial já teria sido completamente degradado (CECCHI *et al.*, 2003; TABATABAEI *et al.*, 2018; HARUN *et al.*, 2019).

Já o tempo de retenção de sólidos (TRS) diz respeito a duração da biomassa ativa de microrganismos dentro do digestor, sendo um parâmetro importante para a eficiência e a estabilidade do processo. Dá mesma forma que o TRH, se o TRS for baixo a matéria orgânica não é completamente degradada enquanto se o TRS for alto demais a produtividade do biogás é reduzida (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2012; TABATABAEI *et al.*, 2018).

De acordo com o tipo de digestor os TRH e TRS podem ser iguais ou diferentes. No caso de digestores que não retêm a biomassa microbiana, como os reatores de mistura completa (em inglês, *Continuous Stirred-Tank Reactor* – CSTR), lagoa anaeróbia e modelos fluxo pistonado convencionais, o TRH acaba sendo igual ao TRS, enquanto que reatores que conseguem aumentar esta concentração como o Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB em inglês) possuem o TRS maior que TRH. Estes reatores também acabam tendo um baixo TRH quando comparado com os sem retenção, como resultado da maior quantidade de microrganismos em contato com o substrato, o que resulta em uma digestão mais rápida, sendo considerado, portanto, digestores mais eficientes (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2012; TABATABAEI *et al.*, 2018).

#### 2.1.2.4.2 Carga orgânica volumétrica (COV)

Essa taxa representa a quantidade de matéria orgânica a ser degradada na corrente de alimentação em um dado valor de tempo e junto com o TRH são os dois parâmetros chave para o cálculo do volume do digestor (CECCHI *et al.*, 2003; TABATABAEI *et al.*, 2018)

Como mencionado na seção 2.1.2.2, o aumento da carga orgânica gera o acúmulo de ácidos, uma vez que a etapa de acidogênese é mais rápida que a metanogênese. Isso faz com que as plantas de biogás geralmente comecem com uma carga orgânica baixa e vão aumentando gradualmente no decorrer do tempo, conforme os microrganismos já estão mais aclimatados e o processo estabilizado (ALVES, V. 2016; TABATABAEI *et al.*, 2018)

A carga orgânica naturalmente varia de substrato a substrato, conforme seu teor de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) que indicam a quantidade de matéria orgânica a ser degradada, assim como também variam a capacidade de cada tipo de digestor. Digestores que permitem maior concentração de microrganismos como os UASB conseguem operar com altas cargas orgânicas apresentando uma maior eficiência (TABATABAEI *et al.*, 2018; DENG *et al.*, 2020).

#### 2.1.2.4.3 Agitação

Embora o emprego de agitação não seja necessário para a ocorrência da digestão anaeróbia, o seu uso em reatores anaeróbicos e biodigestores é extremamente benéfico, elevando as taxas reacionais de degradação da matéria orgânica e produção de biogás. (NSAIR *et al.*, 2020).

A importância da agitação se dá na mistura e homogeneização do meio dentro dos reatores, garantindo um contato eficiente entre substrato e a microbiota além de uma distribuição uniforme de pH e temperatura (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2012; TABATABAEI *et al.*, 2018). Além disso, ao agitar-se o meio reduz-se a criação de sedimentos no reator proporcionando um uso completo do seu volume e combate-se a formação de espuma, capaz de reduzir em até 50% a produção de biogás (NSAIR *et al.*, 2020). A intensidade da agitação também deve ser observada já que uma agitação em alta velocidade pode causar rompimento nas bactérias, devido à tensão de cisalhamento decorrente da velocidade periférica das pás do agitador, enquanto que, em velocidades mais baixas, pode não ocorrer a homogeneização completa do meio (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2012; TABATABAEI *et al.*, 2018).

Atualmente são três os tipos de tecnologia para agitação mais utilizadas: pneumática, que utiliza o próprio biogás gerado para misturar o meio, hidráulica que geralmente faz uso de bombas externas e mecânica, onde pás realizam o trabalho. O conceito estrutural do digestor assim como as características do substrato é que geralmente definem qual tecnologia é a mais adequada (NSAIR *et al.*, 2020; DENG *et al.*, 2020)

## 2.2 O BIOGÁS

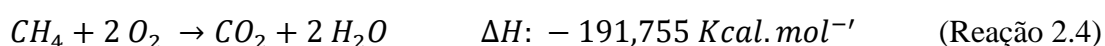
De acordo com Wereko-Brobby e Hagen (2000), citados por Garcilasso e Ferraz Junior, (2018), a composição volumétrica típica do biogás é de cerca de 60% de CH<sub>4</sub>, 35% de CO<sub>2</sub>, enquanto que os 5% restantes compõe-se de uma variação de outros gases como amônia NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, vapor d'água (H<sub>2</sub>O) e nitrogênio (N<sub>2</sub>). Esses valores, no entanto, são variáveis, estando diretamente relacionados ao processo de digestão anaeróbia que dá origem ao gás, sendo afetado por diversos fatores como a composição do substrato a ser digerido, pH e temperatura, conforme mostrado no Quadro 3 (ALVES, V. 2016).

**Quadro 3:** Composição do biogás em função da sua origem

Componente	Resíduos Agrícolas	Resíduos Industriais	Lodos de Depuração	Aterro Sanitário
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 - 80%	50 - 70%	50 - 80%	45 - 60%
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	30 - 50%	30 - 50%	20 - 50%	40 - 60%
Água (H <sub>2</sub> O)	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0 - 2%	0 - 2%	0 - 5%	0 - 0,2%
Sulfeto de Hidrogênio (H <sub>2</sub> S)	100 - 700ppm	0 - 8%	0 - 1%	0 - 1%
Amônia (NH <sub>3</sub> )	Vestígios	Vestígios	Vestígios	0,1 - 1%
Monóxido de Carbono (CO)	0 - 1%	0 - 1%	0 - 1%	0 - 0,2%
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0 - 1%	0 - 1%	0 - 3%	2 - 5%
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0 - 1%	0 - 1%	0 - 1%	0,1 - 1%
Compostos Orgânicos	Vestígios	Vestígios	Vestígios	0,001 - 0,6%*

Fonte: Adaptado de ALVES, V. (2016)

Quanto à sua característica como combustível, o potencial energético do biogás se deve ao grande percentual de CH<sub>4</sub> em sua composição. O CH<sub>4</sub> é um gás incolor e inodoro formado pela união de um átomo de carbono com outros quatro de hidrogênio sendo uma molécula apolar, portanto, apresentando pouca solubilidade em água. Pela configuração dos seus átomos estarem dispostos numa conformação tetraédrica, é um gás em geral bastante estável, mas em contato com o ar, dependendo da graduação da mistura, torna-se extremamente inflamável liberando uma grande quantidade de energia durante a sua combustão, como pode ser visto na reação 2.4 (ALVES, V., 2016):



Isto forma uma relação diretamente proporcional entre a quantidade de metano e o poder calorífico inferior do biogás, conclusão reforçada por Lima e Passami (2012) que ilustram valores de 856 kcal/Nm<sup>3</sup> para uma mistura de 10% de CH<sub>4</sub> e 90% de CO<sub>2</sub> contra 8475,23 kcal/Nm<sup>3</sup> para uma com 99% de CH<sub>4</sub> e 1% de CO<sub>2</sub>.

De fato, para fins de aproveitamento energético, os outros elementos presentes no biogás, listados no Quadro 4, costumam ser considerados impurezas já que contribuem para a diminuição de seu poder calorífico além de acarretarem outros problemas. Assim, dependendo de sua aplicação final, o biogás pode requerer um tratamento posterior de modo a adequá-lo ao seu aproveitamento (SANTOS; JOPPERT, 2018).

**Quadro 4:** Componentes típicos do biogás e seus efeitos como impureza

<b>Componentes</b>	<b>Efeitos</b>
CO <sub>2</sub>	Diminui o poder calorífico do biogás. Além disso pode causar corrosão devido à formação de ácido carbônico na presença de vapor d'água.
H <sub>2</sub> S	É um gás venenoso e corrosivo danificando equipamentos e tubulações. Emite óxidos de enxofre (SO <sub>x</sub> ) durante a sua combustão que formam ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) na atmosfera precipitando sob a forma de chuva ácida.
NH <sub>3</sub>	Emissão de óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) durante a combustão. Formam ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> ) na atmosfera precipitando sob a forma de chuva ácida.
Vapor d'água	Causa corrosão em equipamentos e tubulações além de gerar risco de entupimento em caso de congelamento.
N <sub>2</sub>	Diminui o poder calorífico do biogás.

Fonte: Adaptado de DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008); SANTOS e JOPPERT (2018)

Cassini; Coelho; Pecoara (2014) também apontam que é nesse contexto que nasce o biometano, um biogás purificado, com concentração de metano acima de 99% e que, portanto, apresenta um poder calorífico inferior (PCI) mais elevado, sendo comparável ao do gás natural, como mostrado na Tabela 2. Esse alto PCI, bem como a remoção das impurezas possibilitam a sua aplicação em motores próprios para veículos, habilitando o biogás para ser aproveitado como combustível veicular.

**Tabela 2:** Variação do poder calorífico inferior de diversos gases combustíveis

<b>Gás</b>	<b>PCI (kcal/m<sup>3</sup>)</b>	<b>PCI (kJ/m<sup>3</sup>)</b>
Biometano	8.500	35.558
Propano	22.000	92.109
Butano	28.000	117.230
Gás Natural	7.600	31.819
Biogás	5.500	23.027

Fonte: Adaptado de CASSINI, COELHO e PECOARA (2014)

### 2.2.1 Principais benefícios e aplicações

O biogás possui diversas aplicações e o seu aproveitamento traz uma série de benefícios ambientais, sociais e econômicos.

Como um produto da digestão anaeróbia, o biogás é um biocombustível de origem renovável com uma grande versatilidade, podendo ser gerado a partir de diversos substratos e, portanto, aproveitado em diversos locais. Sua combustão permite a geração de energia térmica e elétrica por meio da queima direta ou uso em equipamentos como caldeiras, motores e turbinas

substituindo o uso de combustíveis fósseis e/ou com alta emissão de poluentes. Além disso, o processo de digestão anaeróbia é historicamente aplicado no tratamento de efluentes e resíduos, o que confere ao biogás uma característica única de valorização de resíduos, transformando um passivo ambiental, num ativo energético (CIBIOGAS, 2020b; MARIANNI, 2018).

Outra grande questão que vem ganhando bastante proeminência é o seu uso como uma ferramenta no combate às mudanças climáticas, já que contribuição do CH<sub>4</sub> no biogás, não se restringe somente a questão energética. O CH<sub>4</sub> é considerado um dos gases de efeito estufa (GEE) sendo um dos grandes responsáveis pelo aquecimento global graças ao seu impacto cerca de 28 vezes superior ao do CO<sub>2</sub>, adotado como referência (IPCC, 2014). De acordo com a IEA (2020) estima-se que a emissão anual global de CH<sub>4</sub> em 2020 tenha sido de 570 Mt das quais 60% foram de origem humana. Deste montante pode-se dizer que o biogás está diretamente relacionado com pelo menos 1/5, uma vez que aproximadamente 20% dessas emissões foram oriundas de atividades de tratamento de efluentes e resíduos sólidos urbanos (GLOBAL METHANE INICIATIVE, 2020).

Ainda neste contexto, algo que torna ainda mais atrativo o uso de tecnologias do biogás é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), previsto do Protocolo de Quioto em que projetos que comprovem reduzir as emissões de GEE recebem certificados chamados Redução Certificada de Emissões (RCE), mais conhecidos como Créditos de Carbono, que são posteriormente vendidos gerando receitas auxiliares (ARAÚJO, 2012). Dessa forma, o aproveitamento do biogás torna-se, além de uma opção ambientalmente correta, economicamente interessante de diversas formas, na medida em que permite a captura e destruição do metano por meio da sua combustão, podendo gerar recursos energéticos e financeiros enquanto impede sua emissão direta para a atmosfera.

No âmbito social, o biogás exerce um papel importante sendo uma solução em países mais pobres ou emergentes. Nesses países geralmente rurais e com diversas regiões sem acesso a eletricidade ou saneamento adequado, o uso de digestores de pequeno porte fornece energia para iluminação e cocção, substituindo a necessidade de queima de combustíveis altamente poluentes como lenha e carvão, além de garantir uma destinação adequada aos resíduos gerados, seja pela agricultura/pecuária familiar ou pelas próprias pessoas, proporcionando melhoria na qualidade de vida (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI 2012; MARIANNI, 2018). Um exemplo da aplicação é a China e a Índia, onde, segundo publicação da *World Biogas Association* (2019), cerca de 50 milhões de fogões a base de biogás são usados nesses países.



Outro benefício na produção do biogás é o uso do digestato produzido juntamente com o biogás durante a digestão anaeróbia. Esse lodo é rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio podendo ser aplicado diretamente no solo como um biofertilizante ou ainda utilizado na produção de fertilizantes organominerais, agregando ainda mais valor ao uso do biogás em propriedades rurais (CIBIOGAS, 2020b)

Por fim, após produzido o biogás ainda pode ser transformado em biometano que graças a sua purificação e concentração, além de ter maior eficiência nas mesmas aplicações que o biogás, pode ser comercializado com status de gás natural ou utilizado como combustível veicular (JOPPERT; SANTOS, 2018).

## 2.3 ELABORAÇÃO DE UMA PLANTA DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES

### 2.3.1 Desenho do processo e escolhas operacionais

O projeto de uma planta de biogás é sempre uma tarefa bastante complexa. A variedade de composições do substrato e finalidades no uso do biogás, além da escolha do aproveitamento ou não do digestato permitem diversas combinações entre diferentes equipamentos, técnicas e processos. A configuração ideal uma planta de biogás é, portanto, o resultado de uma série de tomada de decisões que devem se adequar a fatores como a disponibilidade e características do substrato, local, complexidade tecnológica, além é claro, rentabilidade (TALIA, 2018).

Para Talia (2018) e Nsair e colaboradores (2020), existem quatro escolhas essenciais que devem ser feitas na idealização de uma planta de biogás devido ao seu grande impacto em todas as fases da operação. São estas: Modo de condução, temperatura, via operacional e número de estágios do processo.

#### 2.3.1.1 Modo de condução

O modo de condução do processo diz respeito ao seu regime de alimentação e é dependente da disponibilidade do substrato. Divide-se em três modos: batelada ou descontínuo, contínuo e semicontínuos (PROBIOGAS, 2010; CIBIOGAS, 2020a).

##### 2.3.1.1.1 *Batelada ou descontínuo*

No regime em batelada, a operação funciona em ciclos, intercalando as operações de carga, digestão e descarga do reator (CIBIOGAS, 2020a). Os digestores são alimentados uma única vez, não havendo adição de nova carga de substrato até o fim do processo de digestão,

quando então o reator é aberto e esvaziado, estando pronto para o início de uma nova batelada. Por conta do longo tempo entre a adição de novas cargas, a taxa de produção de biogás em reatores bateladas é inconstante e apresenta uma qualidade disforme, problema que pode ser resolvido com adição de novos reatores operando em série de forma a cobrir este lapso de tempo. É um regime simples e geralmente está associado ao tratamento de resíduos com alto teor de sólidos como no caso da fração orgânica dos resíduos sólidos (FORSU) onde os alimentos se encontram misturados com outros resíduos orgânicos com alta carga de sólidos mas baixa digestibilidade como resíduos de jardinagem e papel. (CIBIOGAS, 2020a; PROBIOGAS, 2010, BANKS *et al.*, 2018).

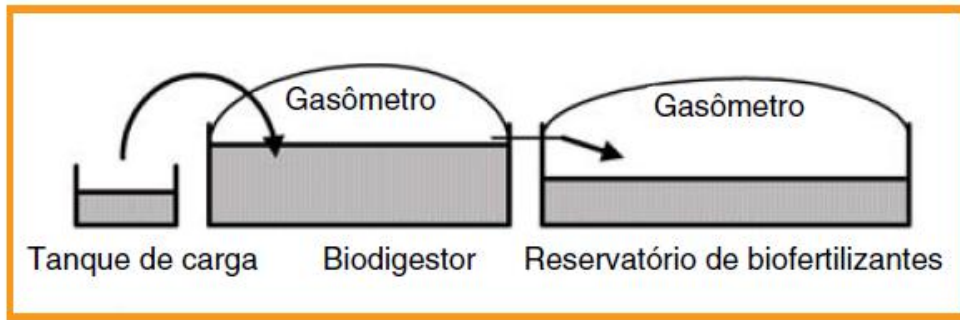
#### 2.3.1.1.2 Contínuo

Como o próprio nome indica caracteriza-se por um fluxo de alimentação contínuo, tornando a produção de biogás e digestato mais estáveis e uniformes, porém gerando mais custos, uma vez que tanto o substrato quanto o digestato têm que estar continuamente sendo alimentados e retirados do digestor (TALIA, 2018). Normalmente está associado ao tratamento de resíduos líquidos ou com baixo teor de sólidos como os efluentes industriais e urbanos (CIBOGAS, 2020a).

#### 2.3.1.1.3 Semicontínuo

É um meio termo entre duas modalidades anteriores onde o regime de alimentação se dá algumas vezes em um determinado espaço de tempo. Segundo Probiogas (2010) este modo oferece vantagens na produção de biogás como a possibilidade de se usar a técnica de fluxo contínuo e armazenamento ilustrada na Figura 2, em que, o substrato é bombeado várias vezes para um tanque pulmão que alimentará o digestor de maneira contínua permitindo desta forma que o reator fique sempre cheio. Com isso, há uma utilização mais eficiente do seu volume e conseqüentemente aumento na produção de biogás e digestato, que ficam armazenados em reservatórios até que haja demanda para sua utilização ou descarte.

**Figura 2:** Esquema simples da técnica de fluxo contínuo e armazenamento



**Fonte:** PROBIOGAS (2010)

### 2.3.1.2 Temperatura

É um dos parâmetros mais importantes da digestão anaeróbia, uma vez que cada microrganismo possui sua faixa ótima de ambientação. Uma variação de temperatura além da faixa tolerada pela microbiota, pode reduzir suas atividades metabólicas a níveis extremos ou mesmo matá-las, inibindo o processo como um todo e conseqüentemente a produção de biogás (BALTRÉNAS; BALTRÉNAITÉ, 2018). Ainda, a temperatura influencia diretamente na cinética das reações químicas e enzimáticas, que dentro de um limite, aumentam sua velocidade conforme a temperatura se eleva (ZHANG *et al.*, 2014; NSAIR *et al.*, 2020).

A escolha da temperatura do processo possui, portanto, um grande impacto na quantidade e qualidade do biogás produzidos, e se dá de acordo com o grupo de microrganismo com que se deseja trabalhar, podendo estes serem psicrófilos, mesófilos ou termófilos.

#### 2.3.1.2.1 *Psicrófilos*

Microrganismos psicrófilos atuam em temperaturas até 25°C, possuindo um ambiente ótimo por volta dos 15°C (KUNZ *et al.*, 2019; BALTRÉNAS; BALTRÉNAITÉ, 2018). Por conta destas baixas temperaturas, digestores em ambiente psicrófilos levam um longo tempo para degradar a matéria orgânica, possuindo TRH acima de 80 dias, o que geralmente inviabiliza seu uso para aplicações comerciais (PROBIOGAS, 2010; TABATABAEI *et al.*, 2018). Estes processos, no entanto, podem ser atrativos para determinadas regiões devido à sua simplicidade tecnológica e baixo custo já que não fazem uso de nenhuma fonte de calor além do natural (BALTRÉNAS; BALTRÉNAITÉ, 2018).

#### 2.3.1.2.2 Mesófilos

Este grupo de microrganismos possuem faixa de atividade entre 25 e 40° C com uma faixa ótima de crescimento a 37°C (KUNZ *et al.*, 2019; BALTRÉNAS e BALTRÉNAITÉ, 2018). Segundo Nsair e colaboradores (2020) são nessas temperaturas em que se observa o maior número de microrganismos com atividade ótima, sendo também considerada a faixa mais comum de operação dos digestores devido ao seu bom rendimento e estabilidade (PROBIOGAS, 2010).

#### 2.3.1.2.3 Termófilos

O último grupo de microrganismos apresentam temperatura de crescimento entre 50 e 65°C sendo a ótima em torno dos 60°C (KUNZ *et al.*, 2019; BALTRÉNAS; BALTRÉNAITÉ, 2018). Devido à esse alcance, processos termofílicos possuem altas taxas reacionais sendo mais eficientes que os demais. Baltrénas e Baltrénaitė (2018) comentam que ambientes termofílicos conseguem tratar a mesma quantidade de biomassa com um TRH 1,5 vezes menor que os mesofílicos, enquanto Zhang e colaboradores (2014) relatam estudos com termófilos que mostram uma produção de biogás acima do dobro, quando comparado com os psicofílicos. Os autores, porém, apontam que esses processos também possuem suas desvantagens como alta gasto de energia para manutenção da temperatura e maior sensibilidade dos microrganismos mesmo a pequenas variações na temperatura.

#### 2.3.1.3 Via operacional

O teor de sólidos é fundamental para a digestão anaeróbia uma vez que é nele que está contido a quantidade de matéria orgânica a ser degradada. Adicionalmente, diversos componentes presentes numa planta de biogás tais como, estruturas de armazenamento, sistemas de alimentação e mesmos a tecnologia empregada nos digestores dependem da consistência do substrato, tornando-o o fator decisivo na escolha da via operacional (PROBIOGAS, 2010; TALIA, 2018).

Embora alguns autores considerem a existência de uma terceira via extrasseca (PROBIOGAS, 2015), em regra as operações de digestão anaeróbia dividem-se em apenas duas: digestão via úmida e digestão via seca.

#### 2.3.1.3.1 Via úmida

Processos em via úmida são tidos como aqueles cujo teor de sólidos totais (ST) na corrente de alimentação se encontra num valor de até 15% da sua massa total (PROBIOGAS, 2010; VAN *et al.*, 2020). Segundo Vandevivere, de Baere e Verstraete (2003), a via úmida é atrativa por empregar tecnologia envolvida similar à utilizada há décadas no tratamento de efluentes, embora geralmente requeiram mais etapas de pré-tratamento, o que adiciona complexidade e custo ao processo.

É atualmente a via de operação mais utilizada no mundo e apesar de normalmente estar associada ao tratamento de efluentes residuais animais e doméstico, é bastante escolhida como via operacional para a digestão de outros substratos cujo teor de ST ultrapassam o limite dos 15% (NSAIR *et al.*, 2020). Nesses casos, o substrato é diluído e homogeneizado até atingir valores abaixo do teor supracitado podendo serem utilizados água fresca, reciclada ou o próprio digestato para tal fim. Embora o uso reciclo de digestato num primeiro momento pareça mais atrativo, devido à vantagem de inocular o substrato fresco já com a microbiota adaptada do digestor (PROBIOGAS, 2010), Shahriari *et al.*, (2011) alerta que esta prática em valores acima de 60% podem gerar problemas ao processo, devido ao aumento da concentração de AGV e NH<sub>3</sub> além dos limites inibitórios.

De uma maneira geral, porém, a redução da concentração de substâncias inibitórias é uma das principais vantagens da via úmida, em especial quando se faz uso de água fresca ou previamente tratada. Isto faz com que essa via seja uma solução bastante atrativa e recorrente para resíduos com alto potencial de inibição por NH<sub>3</sub>, como o caso dos resíduos alimentares (BANKS *et al.*, 2018; VANDEVIVERE; DE BAERE; VERSTRAETE, 2003).

#### 2.3.1.3.2 Via seca

Como contraponto à via úmida, os processos em via seca fazem uso de substratos com teor de ST acima de 20% em massa na corrente de alimentação (VANDEVIVERE; DE BAERE; VERSTRAETE, 2003; TALIA, 2018; VAN *et al.*, 2020). É uma via que vem ganhando cada vez mais destaque no tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) e biomassa dedicada, apresentando um grande número de projetos em escala comercial, principalmente na Europa (PROBIOGAS, 2010; PROBIOGAS, 2015)

As principais vantagens da via seca residem na sua robustez, podendo receber uma elevada carga orgânica volumétrica e tolerar maiores valores na concentração de inibidores (VAN *et al.*, 2020). Isto se deve pela baixa disponibilidade de água que limita a transferência

de massa no meio tornando estas concentrações mais suportáveis para os microrganismos. Há também baixa necessidade de pré-tratamento embora o uso de bombas mais potentes para circular os resíduos altamente viscosos encareça o processo. Para substratos com teor de ST acima dos 30%, Deublein e Steinhauser (2008) apontam que a baixa quantidade de água deixa de ser uma vantagem e começa a se tornar um problema, limitando o crescimento celular e a difusão dos metabólitos.

#### 2.3.1.4 Número de fases/etapas

Como visto, a digestão anaeróbia é composta por quatro etapas bem distintas, cada qual com suas condições e grupos de microrganismos específicos. Assim, o objetivo central dos sistemas multifásicos é separar essas etapas em diferentes reatores, proporcionando condições ambientais ótimas para que cada grupo se desenvolva e eleve sua produtividade ao máximo. Atualmente os processos mais utilizados ocorrem em uma ou duas etapas sendo mono ou bifásicos. Embora existam pesquisas com processos trifásicos, estes ainda se encontram em escala laboratorial, não sendo encontradas referências em aplicações comerciais (VANDEVIVERE; DE BAERE; VERSTRAETE; 2003, VAN *et al.*, 2020).

##### 2.3.1.4.1 Sistemas monofásicos

São os mais comuns, representando a preferência de 95% das plantas em grande escala na Europa. Nestes sistemas todas as etapas reacionais da digestão anaeróbia ocorrem num mesmo reator com os microrganismos dividindo as mesmas condições ambientais. Tem como principais vantagens a simplicidade e economicidade da operação, possuindo menos chances de apresentarem falhas técnicas, além de requererem menos investimento tanto na sua instalação quanto manutenção (VANDEVIVERE; DE BAERE; VERSTRAETE; 2003; NSAIR *et al.*, 2020).

Sistemas monofásicos, porém, também apresentam desvantagens, sendo a maior delas a instabilidade. Van e colaboradores (2020) apontam que o crescimento de diferentes grupos de bactérias em um mesmo reator forma um equilíbrio bastante delicado, tornando o processo muito mais suscetível às variações de pH, temperatura ou carga orgânica. Ainda, esses sistemas possuem menor eficiência na remoção de sólidos voláteis e na produção de metano quando comparados com os sistemas bifásicos (NSAIR *et al.*, 2020).

#### 2.3.1.4.2 Sistemas bifásicos

Geralmente o uso de um sistema bifásico significa operar o primeiro reator para as etapas de hidrólise/acidogênese, e o segundo reator para acidogênese/metanogênese (VAN *et al.*, 2020). Essa configuração permite trabalhar o primeiro reator num ambiente ácido, favorável à hidrólise e à acidogênese, maximizando assim a produção de ácidos voláteis, enquanto que o segundo reator é otimizado para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, conhecidas por sua lenta taxa de crescimento (VANDEVIVERE; DE BAERE; VERSTRAETE; 2003). Apesar de a operação em condições ótimas para cada etapa aumentar a performance do sistema como um todo, a maior vantagem dos sistemas bifásicos é sua grande estabilidade biológica frente aos reatores monofásicos, tolerando mais que o dobro de suas COV (TALIA, 2018). Tal estabilidade é ainda mais evidente quando o segundo reator é um modelo que permita a retenção da biomassa. A alta concentração das arqueas metanogênicas não só aumenta, a resistência aos choques de carga, mas também às substâncias inibidoras como a NH<sub>3</sub>, fato que se traduz em uma preferência no mercado por este tipo de configuração em plantas bifásicas (VANDEVIVERE; DE BAERE; VERSTRAETE; 2003).

### 2.3.2 **Áreas de uma planta de biogás**

#### 2.3.2.1 Pré-tratamento

Esta área tem como objetivo o pré-tratamento do substrato, com o objetivo de facilitar a digestão dentro do reator.

Banks e colaboradores (2020) destacam que no caso dos resíduos alimentares, o único pré-tratamento realmente necessário é a redução do tamanho das partículas. Ele argumenta que pelo próprio fim biológico dos alimentos (ser digerido pelos seres humanos) estes naturalmente já possuem uma alta biodegradabilidade, chamando a atenção para os efeitos adversos do uso de outros procedimentos.

Dependendo da procedência dos resíduos alimentares, no entanto, podem ser necessárias algumas etapas anteriores a redução do seu tamanho. Neste caso, podemos dividir o pré - tratamento geral dos resíduos em três etapas: Triagem, separação e homogeneização (BANKS *et al.*, 2020).

##### 2.3.2.1.1 Triagem

Quando não ocorre uma separação dos resíduos alimentares na fonte, estes geralmente vêm misturados com materiais inertes ou de baixa biodegradabilidade, como plásticos, nos

casos de resíduos oriundos das cozinhas de cantinas e restaurantes, e toda sorte de resíduos orgânicos no caso da FORSU, tais como galhos, plantas, papel e etc. Portanto é necessária uma primeira etapa de triagem, onde estas matérias são removidos de forma a otimizar o processo de digestão anaeróbia (BANKS *et al.*, 2020; FERREIRA, 2015).

#### 2.3.2.1.2 Separação

Em alguns casos, como resíduos alimentares oriundos de supermercado ou resíduos sólidos urbanos, pode ser necessário o emprego de separação mecânica por meio de uso de equipamentos como tambores rotativos, discos de tela, máquinas para remoção de embalagens e outros materiais. Se os resíduos alimentares forem usados em codigestão com outros substratos, pode haver também a necessidade de equipamentos adicionais, para a retirada de outros contaminantes característicos destes substratos (BANKS *et al.*, 2020).

#### 2.3.2.1.3 Pré-tratamento do substrato e Homogeneização

Banks e colaboradores (2020) dividem esta etapa em duas partes. Na primeira parte, é onde ocorre de fato o pré-tratamento da matéria orgânica cabendo ressaltar que, independentemente do método escolhido, todas técnicas de pré-tratamento que atuam sobre o substrato possuem um único objetivo: acelerar as reações da etapa de hidrólise (FORSTER-CARNEIRO, 2012; ZHANG *et al.*, 2014).

Como já abordado, a hidrólise é considerada a etapa limitante da digestão anaeróbia devido à complexidade estrutural das macromoléculas que tornam sua degradação mais lenta e difícil, especialmente nos casos da celulose e da lignina. O pré-tratamento do substrato altera essas estruturas, facilitando o ataque das enzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas, o que aumenta não só a velocidade do processo como um todo, mas também sua eficiência, na medida em que há maior disponibilidade de substâncias para serem metabolizadas pelos microrganismos nas etapas subsequentes levando a uma maior produção de metano (FORSTER-CARNEIRO, 2012).

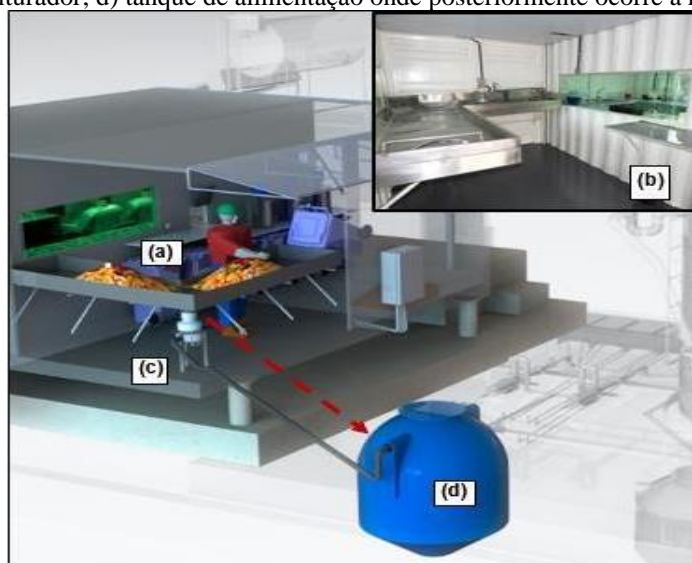
No caso dos resíduos alimentares, utiliza-se a técnica de redução de partículas, onde resíduos passam por um triturador ou moedor que transformam as estruturas longas e complexas encontradas, em curtas e simples, aumentando a área de contato disponível para enzimas no substrato (FORSTER-CARNEIRO, 2012). Zhang e colaboradores (2014) destacam a importância desse primeiro passo observando que diversos estudos têm comprovado a sua eficiência na digestão de resíduos alimentares, chegando a aumentar em 40% a disponibilidade



de matéria orgânica a ser degradada. Os autores, porém, ressaltam que a redução excessiva no tamanho das partículas aumenta a concentração de AGV, uma vez que as fases de hidrólise e acidogênese ocorrem mais rapidamente que a metanogênese, podendo gerar efeitos inibitórios devido ao seu acúmulo.

Após a trituração dos resíduos alimentares, ocorre a segunda parte, a homogeneização. Essa etapa geralmente é realizada em tanques de alimentação, ou em equipamentos como hidrociclones, podendo, no caso dos tanques, ser automatizada com o uso de sistemas de agitação ou manual. A depender da via operacional escolhida, é onde ocorre também a diluição do substrato caso este não tenha sido diluído antes de sua entrada no triturador. A homogeneização é fundamental para garantir boas condições na corrente de alimentação do digestor, evitando problemas de transporte na bomba de alimentação além de minimizar a chance de outros problemas como a formação de sedimentos e sobrenadantes dentro do digestor (FERREIRA, 2015; BANKS *et al.*, 2020). A figura 3 ilustra um sistema de pré-tratamento para resíduos alimentares

**Figura 3:** Sistema de pré-tratamento utilizado na pMethar. a) Etapa de triagem dos alimentos; b) vista geral do galpão de triagem; c) triturador; d) tanque de alimentação onde posteriormente ocorre a homogeneização.



Fonte: FERREIRA (2015)

### 2.3.2.2 Área de Digestão Anaeróbia

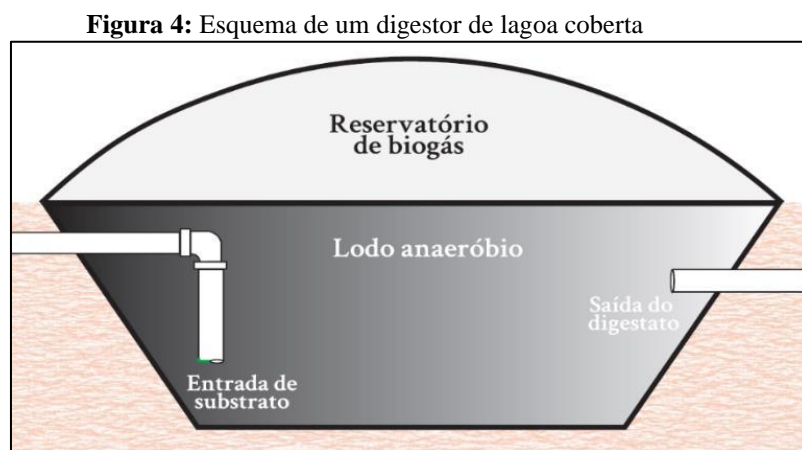
Existem diversas formas de se classificar um digestor sendo a mais comum pelo regime de alimentação. Neste capítulo, optou-se por ressaltar alguns dos principais reatores que operam em condução semicontínua e/ou contínua, uma vez que este regime constitui a grande maioria das plantas de biogás.

### 2.3.2.2.1 *Digestores de fluxo pistonado*

Digestores de fluxo pistonado, também chamados de digestores de fluxo laminar ou tubular, compreendem uma grande variedade de modelos e recebem esse nome por fazerem uso do efeito de recalque que ocorre durante a introdução de substrato fresco para produzir um fluxo em forma de pistão através do biodigestor (PROBIOGAS, 2010). Esse regime acaba por formar gradativamente diferentes ambientes dentro do reator, com a hidrólise ocorrendo mais próxima à entrada e à metanogênese mais próxima a saída, o que reduz o risco de o substrato na saída do digestor não estar completamente degradado (VALIJANIAN *et al.*, 2018).

O modelo mais convencional de digestores de fluxo tubular é o digestor de lagoa coberta, também conhecido como modelo canadense. São extremamente simples, consistindo em um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto por uma membrana flexível que veda o reator ao mesmo tempo que funciona como seu gasômetro (KUNZ *et al.*, 2019). Conceitualmente não possuem sistemas de aquecimento nem agitação, o que leva a longos TRH, chegando a 50 dias (VAN *et al.*, 2020)

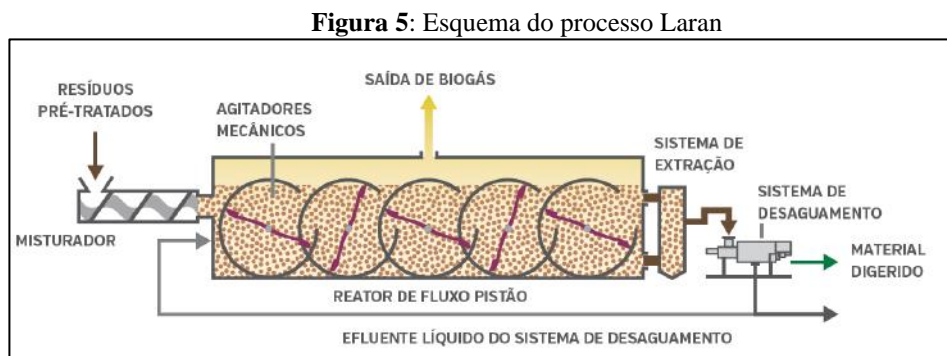
Os reatores de lagoa coberta (Figura 4) são bastante utilizados no meio rural para o tratamento de dejetos animais sendo bastante atrativos devido ao seu baixo custo. A falta de um sistema de aquecimento, porém pode gerar problemas na geração do biogás caso o local varie bastante de temperatura. Outras desvantagens consistem na baixa COV, até 0,5 kgVS/m<sup>3</sup> dia e requisito de efluentes com teor de ST abaixo de 3% (KUNZ *et al.*, 2019).



**Fonte:** KUNZ *et al.* (2019)

Nos últimos anos, vêm ocorrendo uma modernização nos reatores de fluxo tubular que passaram a ser construídos em tanques de aço verticais e horizontais, com aquecimento e em alguns casos até mesmo agitação auxiliar, assemelhando-se a um digestor de mistura completa.

Esses reatores são bastante usados na via seca para tratamento da FORSU e resíduos agrícolas e correspondem as principais tecnologias comerciais disponíveis hoje no mercado, como os processos Valorga, Axpo Kompogas e o processo Laran (Figura 5) (PROBIOGAS, 2015a).



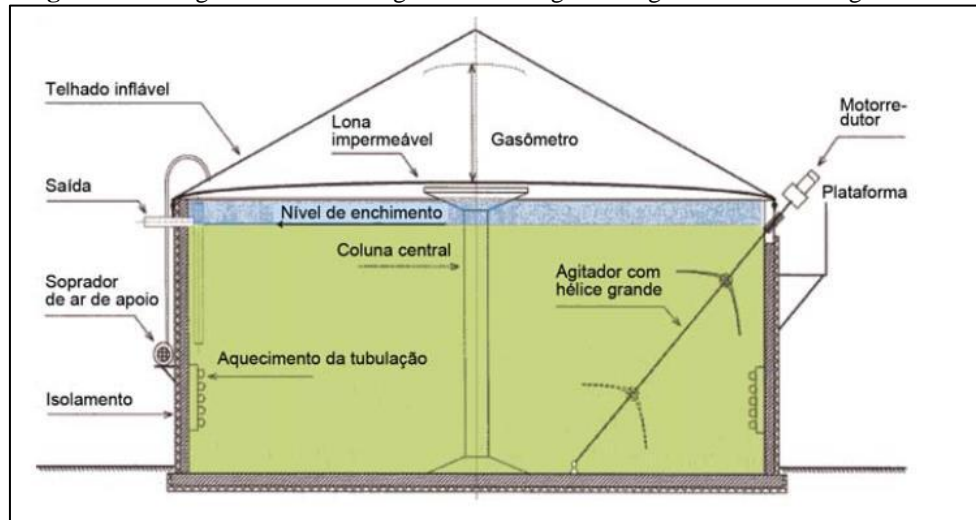
**Fonte:** PROBIOGAS (2015a)

#### 2.3.2.2.2 Mistura Completa

Os reatores de mistura completa ou CSTR (do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*) têm como principal característica o emprego de sistemas de agitação, o que possibilita a mistura completa do meio, garantindo a homogeneização das condições ambientais, além de um contato mais eficiente entre o substrato e microrganismos (KUNZ *et al.*, 2019; VALIJANIAN *et al.*, 2018). O método mais utilizado é a agitação mecânica, onde geralmente se requer uma potência aplicada da ordem  $0.0065 \text{ kW/m}^3$ , porém podem ser utilizados também os métodos hidráulicos ou pneumáticos, a depender das características do efluente. Esses reatores também apresentam aquecimento e isolamento térmico, o que permite operarem nas faixas meso e termofílicas, aumentando ainda mais a eficiência do processo (DENG *et al.*, 2020). A Figura 6 retrata um reator CSTR típico utilizado para a produção de biogás.

Os reatores CSTR são bastante atrativos pela sua simplicidade e principalmente versatilidade, uma que vez que podem operar numa larga margem de sólidos, variando entre 5 a 15 e em alguns casos especiais até mesmo 20% de ST. Não à toa são os modelos mais utilizados nas plantas de biogás, sendo adequados para a digestão anaeróbia de lodo de esgoto, resíduos alimentares, resíduos de vinhaça, dejetos de animais e qualquer outra matéria orgânica desde que bombeável (VALIJANIAN *et al.*, 2018; DENG *et al.*, 2020; PROBIOGAS; 2015b).

**Figura 6:** Biodigestor CSTR com gasômetro integrado e agitador de eixo longo



Fonte: PROBIOGAS (2010)

A principal desvantagem dos modelos CSTR reside no fato desses reatores não conseguirem reter a biomassa microbiana, o faz com que as bactérias saiam juntas com o efluente, levando a uma baixa concentração de biomassa ativa dentro do reator. Isto limita a COV aplicada para valores de no máximo  $5\text{kgVS}/\text{m}^3$  dia e implica TRH longos, com média mínima de 20 dias (VAN *et al.*, 2020; DENG *et al.*; 2020). Esse problema, contudo, pode ser contornado utilizando-se uma configuração chamada de reator anaeróbico de contato, em que um equipamento que permita separar a biomassa ativa do efluente de descarga é colocado na saída do reator, recirculando a biomassa separada novamente para o seu interior, o que permite alcançar melhores resultados.

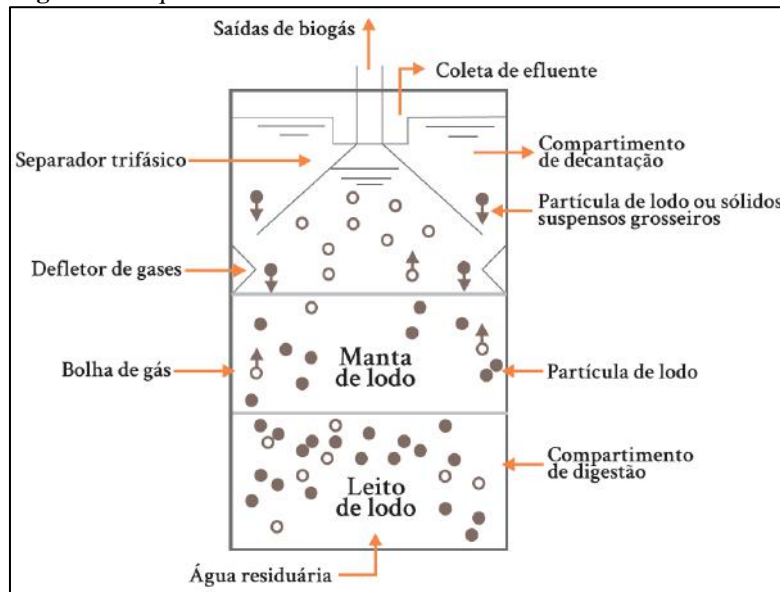
#### 2.3.2.2.3 Reatores anaeróbios de fluxo ascendente

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente ou UASB, (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) caracterizam-se pelo seu fluxo ascendente e a presença de uma camada de lodo suspensa, confinada na parte inferior do reator, razão pela qual também são conhecidos como reatores de manta de lodo (CASSINI; COELHO; PECOARA, 2014; VALIJANIAN *et al.*, 2018).

Nesses reatores a corrente a ser tratada flui pelo fundo da câmara de digestão, entrando em contato com lodo onde é digerida, primeiramente na fase de leito (composta por grânulos mais densos e compactos) e posteriormente na fase de manta (grânulos mais leves e dispersos). Esses grânulos servem de suporte aos microrganismos e portanto, ambas as fases possuem uma densidade populacional bastante elevada, o que confere a estes reatores a capacidade de tratar

altas cargas orgânicas volumétricas , de até 8kgSV/m<sup>3</sup> dia, em um baixo TRH, variando entre 4 a 72 horas (KUNZ *et al*, 2019, CIBIOGAS, 2020a).

**Figura 7:** Esquema de um reator anaeróbico de fluxo ascendente



**Fonte:** KUNZ *et al.* (2019)

O biogás produzido é liberado continuamente em forma de bolhas dissolvidas no meio que são, então, separadas no topo por meio de um separador trifásico. Este separador impede que alguns grânulos mais leves carregados tanto pelo fluxo ascendente quanto pelas bolhas de gás geradas, saiam junto com o efluente do reator, floculando e assentando novamente na camada de lodo suspensa (DENG *et al.*, 2020, CIBIOGAS, 2020a).

Entre as principais vantagens deste reator podemos citar a alta retenção da biomassa microbiana, suportando altas COV em baixo TRH; agitação realizada pelas próprias bolhas de biogás formado além da ausência de material para fixação dos microrganismos, otimizando custos. Já como desvantagens podemos observar a restrição do substrato à efluentes com teor de ST inferior a 3-5 %, tornando seu uso inviável em configurações monofásicas para diversos substratos devido aos custos com pré-tratamento e diluição, e a alta sensibilidade à baixas vazões de efluente.

### 2.3.2.3 Pós tratamento do biogás

Ao sair do digestor o biogás se encontra em seu estado bruto, apresentando substâncias como vapor d'água, NH<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>S que mesmo em quantidades traço são potencialmente perigosos a equipamentos e outras estruturas da planta. A necessidade ou não de remoção dessas

impurezas irá depender de suas concentrações iniciais e do destino que se quer dar ao gás, variando-se os valores máximos permitidos de acordo com as especificações dos equipamentos utilizados, como se observa no Quadro 5 (KUNZ *et al.*, 2019).

O pós tratamento do biogás pode se dividir em duas etapas distintas, limpeza e purificação. Os processos que removem tais substâncias potencialmente danosas são denominados de processos de limpeza e no caso do biogás gerado a partir de resíduos alimentares, devido às características de sua composição, compreendem principalmente as etapas de secagem e dessulfurização, podendo haver uma etapa adicional para remoção da amônia a depender da escolha tecnológica realizada nas etapas anteriores (SANTOS; JOBERT, 2018).

Os processos de purificação, têm como objetivo o refino do biogás a biometano e se dão através da remoção de substâncias que reduzem o seu poder calorífico como N<sub>2</sub> e mais notadamente o CO<sub>2</sub>. Como o foco deste trabalho é a produção e uso do biogás em si, estes processos, portanto, não serão comentados.

**Quadro 5:** Especificações para o uso do biogás com seus principais contaminantes

Uso final do Biogás / Biometano	Tratamentos Requisitado		
	Remoção de umidade	Remoção de H <sub>2</sub> S	Remoção de CO <sub>2</sub>
Uso direto para geração de calor	Necessário	<347 mg/m <sup>3</sup>	Não necessário
Cogeração de eletricidade e calor em motores internos	Necessário	757 - 2422 mg/m <sup>3</sup>	Não necessário
Cogeração em turbinas e microturbinas	Necessário	< 13905 mg/m <sup>3</sup>	Necessário apenas para microturbinas <50% em vol.
Injeção na rede de gás natural	Necessário	< 10 mg/m <sup>3</sup>	< 3% mol
Combustível veicular	Necessário	< 10 mg/m <sup>3</sup>	< 3% mol

Fonte: Adaptado de KUNZ *et al.* (2019), GARCILASSO e FERRAZ JUNIOR (2018), RODERO *et al.* (2018)

#### 2.3.2.3.1 Remoção da umidade

Ao sair do digestor o biogás se encontra saturado de vapor d'água podendo o seu teor de umidade chegar a 10% de seu volume total (Rodero *et al.*, 2018; CIBIOGAS, 2020b). A presença desse vapor é um problema, pois quando condensada, a água pode se combinar ao CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S presentes no biogás formando ácidos que danificam tubulações, motores e outros equipamentos. Além disso, a água pode causar entupimento seja pelo acúmulo em sua forma

líquida ou mesmo congelada dependendo da pressão e temperatura utilizadas (KUNZ *et al.*, 2019; DENG *et al.*, 2020).

Segundo Muñoz *et al.*, (2015), atualmente as tecnologias para remoção de umidade do biogás dividem-se entre os métodos de condensação, adsorção e absorção, sendo o ponto de orvalho considerado o indicativo de sua eficiência. Quanto menor o ponto de orvalho alcançado menor o risco de condensação e, portanto, mais refinado é considerado o gás.

#### 2.3.2.3.1.1 Absorção

A remoção por absorção faz uso de substâncias químicas com alto poder higroscópico, que ao entrar em contato com o gás incorporam sua massa d'água, desidratando-o (CIBIOGAS, 2020b). Compostos como glicol e trietilenoglicol são os mais recomendados pela literatura e tem a capacidade de reduzir o ponto de orvalho do gás para  $-100^{\circ}\text{C}$ , além de reter eventuais gases orgânicos. O uso desta técnica, no entanto, é um procedimento bastante oneroso, uma vez que envolve custo com aquisição, regeneração e descarte do glicol/etilenoglicol. Ainda, as condições de operação exigem pressões moderadas e alta temperatura – cerca de  $200^{\circ}\text{C}$  na etapa de regeneração – sendo um processo economicamente viável somente para operações com vazão no mínimo  $500\text{m}^3/\text{h}$  de biogás (MUÑOZ *et al.*, 2015; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; PROBIOGAS, 2010).

#### 2.3.2.3.1.2 Adsorção

Na adsorção, o biogás entra em contato com substâncias porosas que retém as moléculas de água em sua superfície, enquanto o gás prossegue desidratado. Os processos geralmente usam sílica, óxido de magnésio ou carvão ativado como adsorventes, destacando-se o carvão ativado que possui uma capacidade de refino maior, removendo também outras impurezas do gás como o  $\text{H}_2\text{S}$ . É uma técnica mais eficiente comparada às demais e pode atingir pontos de orvalho até  $-90^{\circ}\text{C}$ , porém, assim como a absorção é um procedimento bastante oneroso. Além dos custos envolvidos com os adsorventes, o processo requer condições moderadas de pressão durante adsorção e altas temperaturas para regeneração do adsorvente, além de ser recomendado apenas para vazões pequenas a moderadas o que faz com que o seu uso seja restrito (MUÑOZ *et al.*, 2015; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; SANTOS; JOPPERT; 2018).

### 2.3.2.3.1.3 Condensação

O método de condensação envolve alterar o equilíbrio termodinâmico do vapor d'água forçando sua mudança para o estado líquido mediante alterações na temperatura e/ ou pressão (SANTOS; JOPPERT, 2018). O resfriamento do gás pode ser feito com uso de trocadores de calor ou pela sua refrigeração ao longo da tubulação. É necessário que a tubulação seja longa o suficiente, ao menos 50 metros, para que haja tempo de o gás condensar além de ter uma ligeira inclinação e dispositivos como purgadores de vapor para recolhimento do condensado. Pode-se também aprimorar o resfriamento da tubulação enterrando-a ou adicionando uma fonte de refrigeração externa, o que implica custo adicional, porém exibe maior eficiência (PROBIOGAS, 2010; KUNZ *et al.*, 2019; DENG *et al.*, 2020).

Diferentemente dos métodos anteriores, a condensação não pode ser utilizada para transformação do biogás em biometano uma vez que à pressão atmosférica, só se consegue atingir valores de ponto de orvalho até 0,5°C enquanto o requisito imposto pela ANP varia entre -39 a -45°C dependendo da região. Contudo, apesar de apresentar menor eficiência, ainda é o método mais utilizado pela sua simplicidade e economia, além de conseguir remover outras impurezas que se dissolvem na água como o caso da NH<sub>3</sub>. Neste ponto vale ressaltar que equipamentos como desembaçadores e ciclones também são frequentemente utilizados para melhorar a remoção do condensado (KUNZ *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2016; MUÑOZ *et al.*, 2017; ANP, 2017).

Outro ponto a se destacar é o efeito na alteração da pressão. Segundo Deublein e Steinhauser (2008) a compressão do biogás a 12 bar já é o suficiente para deixar o gás pré-seco, enquanto que outros estudos apontam que não só é comum o aumento da pressão antes do resfriamento como também há um ganho de eficiência na operação que pode chegar a atingir um ponto de orvalho de -18°C. (MUÑOZ *et al.*, 2015; DENG *et al.*, 2020; SANTOS, JOPPERT 2018).

Por fim, Deublein e Steinhauser (2008) comentam que um ponto de orvalho de 5°C é o suficiente para prevenir que à temperatura ambiente ocorra condensação ou formação de ácidos nas linhas de transmissão, permitindo o uso do biogás em quaisquer que sejam suas aplicações com exceção à transformação em biometano.



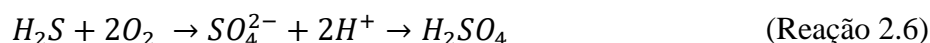
### 2.3.2.3.2 Remoção do H<sub>2</sub>S

O H<sub>2</sub>S é produzido na digestão anaeróbia durante as reações de sulfetogênese e sua concentração no biogás bruto pode variar entre 140 e 13.905 mg/m<sup>3</sup> a depender da concentração do teor de proteínas e sulfato no substrato inicial (KUNZ *et al.*, 2019; DENG *et al.*, 2020).

Pelo fato de a sua presença ser indesejada, a remoção do H<sub>2</sub>S é uma etapa essencial nas plantas de biogás e sua importância se reflete na ampla variedade de tecnologias e técnicas que podem ser empregadas. A título de organização estas técnicas serão separadas em 4 métodos: remoção por tratamentos biológicos, remoção por adsorção, remoção por absorção em quelato de ferro (Fe<sup>3+</sup>-EDTA) e precipitação *in situ* com sais de ferro.

#### 2.3.2.3.2.1 *Remoção por tratamentos biológicos*

A remoção do H<sub>2</sub>S por tratamento biológico é baseada na capacidade que algumas bactérias quimiolitotróficas possuem de oxidar o H<sub>2</sub>S para obtenção de energia. Estas bactérias utilizam o O<sub>2</sub> presente no ar como aceptor de elétrons convertendo o H<sub>2</sub>S à SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ou enxofre elementar (S), como evidenciados por Deublein e Steinhauser (2008) e Muñoz e colaboradores (2015) nas reações 2.5 e 2.6:



Segundo Santos e Joppert (2018) a quantidade de ar necessária deve obedecer a razão de 8 a 12% da vazão do biogás, enquanto que Deublein e Steinhauser (2008) ressaltam que normalmente a rota do enxofre elementar predomina numa razão de 75/25 para a do sulfato.

Os tratamentos biológicos podem ser aplicados para concentrações de H<sub>2</sub>S até 3000mg/m<sup>3</sup> possuindo baixo custo e baixa demanda de energia. Dividem-se principalmente entre as tecnologias de biodessulfurização *in situ* e tratamento com biofiltro percolador (SANTOS; JOPERT, 2018).

A biodessulfurização *in situ* consiste na injeção de ar dentro do digestor, promovendo a degradação do H<sub>2</sub>S pelos microrganismos ali presentes. Tem como grande vantagem justamente o fato dos microrganismos e nutrientes já se encontrarem dentro do digestor, não requerendo inóculo ou meio de cultura. Além disso, o enxofre elementar produzido na degradação do H<sub>2</sub>S fica retido no digestato, o que enriquece suas propriedades e características como biofertilizante (PROBIOGÁS, 2010). Vale recordar, no entanto, que as arqueas metanogênicas são

extremamente sensíveis ao O<sub>2</sub> o que pode levar a falhas no processo caso a concentração de ar injetado não seja bem controlada (SANTOS; JOPPERT, 2018).

No caso dos biofiltros percoladores, preenche-se uma coluna com material inerte de alta área superficial que é usado como suporte para que as bactérias se estabeleçam, formando um biofilme por onde o biogás passa e o H<sub>2</sub>S é removido. Diferentemente da dessulfurização *in situ*, há a desvantagem do custo com a necessidade inicial de inóculo e o contínuo suprimento dessas bactérias com uma solução nutritiva para sua manutenção, o que pode ser reduzido com a utilização do digestato (KUNZ *et al.*, 2019). De forma geral, é uma técnica que possui ótimo custo benefício, permite um fácil controle do processo e pode reduzir uma concentração de 5000 parte por milhão em volume (ppmv) de H<sub>2</sub>S à níveis inferiores a 100 ppmv, o que, aliado à sua capacidade de remoção de outros componentes como a NH<sub>3</sub> tornam seu uso cada vez mais popular (AWE, 2016; SANTOS; JOPPERT, 2018).

#### 2.3.2.3.2.2 Remoção por adsorção

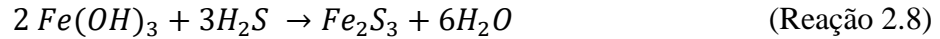
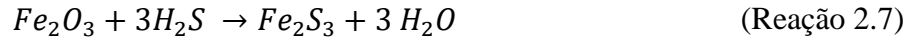
Da mesma forma como ocorre na adsorção da umidade, a remoção por adsorção do H<sub>2</sub>S faz uso de materiais sólidos com grande área superficial que interagem físico-quimicamente com o biogás retendo o H<sub>2</sub>S em sua superfície enquanto o gás prossegue limpo. É um método aplicável para vazões entre 10 a 10.000m<sup>3</sup>/h de gás e concentrações entre 70 a 5000ppmv sendo altamente eficiente embora resulte em um alto custo devido à manutenção dos adsorventes e condições de operação (SANTOS; JOPPERT, 2018).

Segundo Awe e colaboradores (2016) e Rodero e colaboradores (2018), entre as técnicas atuais mais utilizadas destacam-se a remoção por adsorção em carvão ativado e a remoção por adsorção em compostos de ferro, notadamente, óxido (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou hidróxido de ferro (Fe(OH<sub>3</sub>)).

A utilização do carvão ativado como adsorvente traz duas opções de remoção do H<sub>2</sub>S, por adsorção física na superfície do carvão ou catálise química através da oxidação do H<sub>2</sub>S à enxofre elementar e água. Para que essa última opção ocorra, no entanto, é necessário que o carvão seja antes impregnado com algum catalisador, como permanganato ou iodeto de potássio, além de ser submetido à pressão e à temperatura nas faixas de 8 bar e 70°C, respectivamente (MUÑOZ *et al.*, 2015; RODERO *et al.*, 2018). Embora apresente a capacidade de remover o H<sub>2</sub>S a níveis bem baixos, Santos e Joppert (2018) observam que o elevado custo operacional desta técnica a habilita apenas para alguns casos específicos.

Como explicam Muñoz e colaboradores (2015) o processo de adsorção com compostos de ferro, ocorre com a passagem do gás por uma estrutura formada por dois módulos em

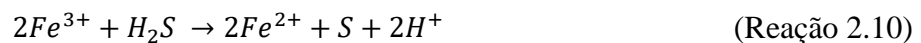
paralelo recheados com  $Fe_2O_3$  ou  $Fe(OH)_3$ , operando num ciclo adsorção-regeneração como demonstrado pelas equações 2.7 a 2.9 :



Este método tem capacidade de tratar altas concentrações  $H_2S$  com grande eficiência, podendo ser usado quando as concentrações iniciais estão entre 150 e 7500mg/m<sup>3</sup> e retornando resultados de até 1,5 mg/m<sup>3</sup> (DEUBLEIN; STEINHAUSER,2008). A eficiência somada à simplicidade de sua operação tem elevado o uso da tecnologia, porém o alto custo associado à regeneração e reposição dos adsorventes ainda impõem uma barreira limitando a sua escala de aplicação (MUÑOZ *et al.*, 2015).

#### 2.3.2.3.2.3 Remoção por absorção em quelato de ferro

Um dos métodos mais utilizados para remoção do  $H_2S$ , a absorção em soluções de quelato de ferro ( $Fe^{3+}$ -EDTA) possui eficiência entre 90 – 100% sendo realizada em pressão e temperatura ambientes (RODERO *et al.*, 2018). O mecanismo da técnica é exposto na reação 2.10 por Deublein e Steinhauser (2008) e envolve a redução dos íons  $Fe^{3+}$  à  $Fe^{2+}$ . O quelato é necessário para evitar que se forme sulfeto de ferro ( $FeS$ ) ou  $Fe(OH)_3$  espontaneamente após as reações.



Ainda, o quelato ainda pode ser regenerado pela reação do  $Fe^{2+}$  com o  $O_2$  presente no ar, resultando na recuperação do  $Fe^{3+}$  e água (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Apesar de suas vantagens, Awe e colaboradores (2016) aponta que esta é uma técnica de difícil execução assim como a regeneração por oxigenação que pode levar a formação de trissulfatos.

#### 2.3.2.3.2.4 *Precipitação in situ com sais de ferro*

Consiste na adição de sais de ferro como sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ) e cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) diretamente no digestor. Ao entrar em contato com meio aquoso estes sais se dissociam liberando íons de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  que então reagem com o  $\text{H}_2\text{S}$  precipitando sob a forma de  $\text{FeS}$  como mostrado por Muñoz e colaboradores (2015) nas reações 2.11 e 2.12:



Essa técnica pode ser usada para tratar grandes concentrações de  $\text{H}_2\text{S}$  apresentando boa eficiência embora não possa atingir níveis mais rigorosos de redução, chegando até 150ppmv. Outra desvantagem é que ela exibe um alto custo operacional devido ao preço de aquisição dos sais (MUÑOZ *et al.*, 2015)

#### 2.3.2.4 Armazenamento do biogás

A presença de gasômetros, é essencial para cobrir qualquer descompasso que possa haver entre a demanda e a produção de biogás, nem sempre constantes, evitando o descarte do seu excedente além de garantir o volume necessário à sua utilização (DENG *et al.*, 2020; PROBIOGAS, 2010). A escolha da estrutura mais adequada leva em consideração principalmente a destinação final que se dá ao gás, já que as condições de volume e pressão variam para cada aplicação. (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008)

##### 2.3.2.4.1 Gasômetros de baixa pressão

Essas estruturas mantêm o biogás a uma pressão manométrica positiva de até 10kPa, sendo encontrado em plantas que visam à sua utilização para geração de energia elétrica ou como combustível para suprir as necessidades domésticas (DENG *et al.*, 2020). No caso do uso como combustível doméstico, Deng e colaboradores (2020) recomendam um volume de 50 a 60% da vazão média diária utilizada. Já para em relação à geração de energia elétrica, os autores distinguem os volumes entre geração contínua e intermitente, recomendando uma relação de 10 – 30% do consumo diário para os geradores que operam de forma contínua e um volume maior que um período de operação para os trabalham em modo descontínuo.

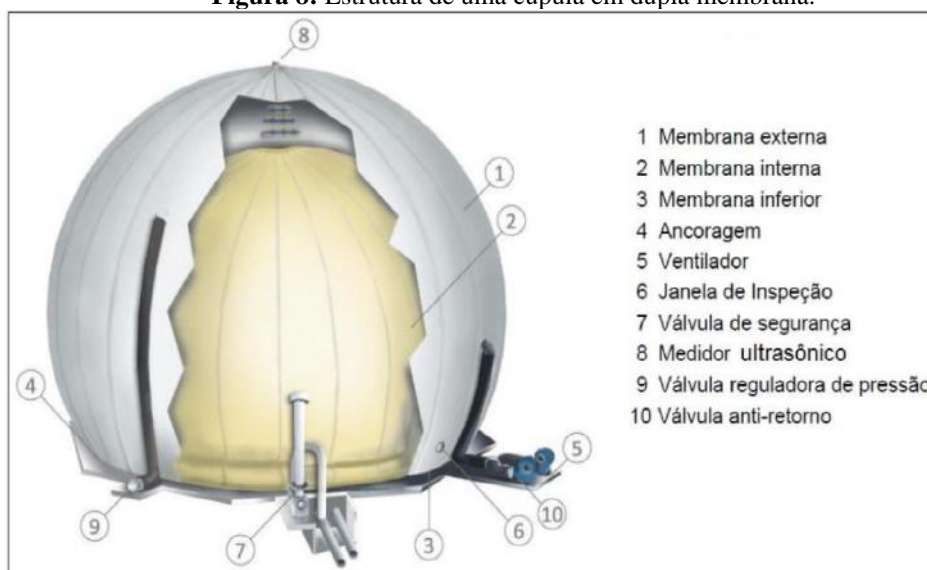
Os gasômetros de baixa pressão são os mais utilizados e apresentam diversas formas, podendo ser instalados de maneira integrada, onde formam um teto junto ao digestor ou como estruturas externas. As baixas pressões permitem o uso de materiais flexíveis, tornando estes gasômetros capazes de armazenar grandes volumes a um baixo custo. Os materiais mais utilizados são membranas sintéticas compostas por polietileno de alta densidade (PEAD), policloreto de vinila (PVC), entre outros, que, além da flexibilidade, são impermeáveis e geralmente apresentam também boa resistência às intempéries e fraturas mecânicas, evitando o escape do gás e a constante manutenção do gasômetro (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; CIBIOGAS, 2019).

#### *2.3.2.4.1.1 Gasômetro integrado*

No caso do armazenamento integrado, as configurações mais comuns são o telhado de lona, cúpula simples e em dupla membrana. No primeiro, uma lona é instalada sobre uma armação que cobre o digestor formando um telhado inflável que se enche conforme o biogás vai sendo produzido no interior do reator (PROBIOGAS, 2010). Já as cúpulas simples funcionam de forma similar ao telhado de lona, porém sem fazerem uso de uma estrutura de apoio, fixando a cobertura diretamente nas bordas do digestor (CIBIOGAS, 2019).

As cúpulas em dupla membrana, embora também possam ser utilizadas como um gasômetro externo, frequentemente são vistas de forma integrada com o biodigestor e fazem uso de membranas de alta resistência que são fixadas junto ao digestor ou quando externas, numa estrutura de concreto armado e aço galvanizado. Apesar de terem o termo “dupla” no nome, são utilizadas na realidade três membranas: inferior, interna e externa. A primeira é responsável por selar o gasômetro na fundação ou no digestor, a segunda por reter o biogás, e a terceira por proteger a segunda, sendo mantida constantemente tensionada por um sistema que injeta ar entre as duas membranas. Esse tensionamento, além de conferir uma maior resistência a membrana externa, faz com que a cúpula seja mantida estável o que permite que o reservatório armazene um volume ainda maior de biogás (DEUBLEIN; STEINHAUSER; CIBIOGAS, 2019). A Figura 8 esquematiza a estrutura de uma cúpula em dupla membrana.

**Figura 8:** Estrutura de uma cúpula em dupla membrana.



Fonte: CIBIOGAS (2019)

#### 2.3.2.4.1.2 *Gasômetro externo*

Quando não se pode fazer uso de um gasômetro integrado ou opta-se por não o fazer, o armazenamento do biogás é feito em um gasômetro externo. Além da estrutura já citada em dupla membrana, o mais comum é o uso dos gasômetros do tipo balão, estruturas simples que consistem apenas numa membrana inflável com uma conexão para entrada e outra para saída do gás. Podem ser encontrados dispostos ao ar livre, ou enclausurados por uma estrutura rígida como um edifício, galpão ou mesmo um tanque. Nesse caso, a última opção é sempre recomendada uma vez que fornece ao balão maior proteção contra intempéries e exposição a outros tipos de risco (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; CIBIOGAS, 2019).

#### 2.3.2.4.2 *Gasômetros de média/alta pressão*

Gasômetros de média/alta pressão são comumente encontradas em plantas de biometano devido à necessidade do seu armazenamento em alta pressão ou quando o biogás necessita ser transportado a longas distâncias, compensado assim as perdas de pressão através do trajeto. Tais estruturas conseguem suportar pressões manométricas positivas de 0,4MPa - 1,6 MPa e são feitas de aço, apresentando forma cilíndrica para pequenos volumes ou esférica para grandes volumes, devido ao menor custo material para alocar o mesmo volume, quando comparada a outras estruturas geométricas (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; DENG *et al.*, 2020).

### 2.3.2.5 Conversão e utilização do biogás

O aproveitamento energético do biogás, a exceção das células combustíveis, ocorre por meio da sua combustão, onde a sua energia química é convertida em energia térmica que pode ser aproveitada diretamente para geração de calor ou indiretamente na geração de energia elétrica. Utiliza-se a palavra “indireta” uma vez que a energia térmica não pode ser aproveitada diretamente por um gerador, necessitando ser primeiramente convertida em energia mecânica, o que gera perdas de energia na forma de calor tornando a produção de energia elétrica um processo de baixo rendimento (PROBIOGAS, 2010; SANTOS; JOPPERT, 2018; DENG *et al.*, 2020).

Existem duas formas atualmente para contornar o baixo rendimento elétrico de sistemas a combustão, sendo a primeira pelo uso de células combustíveis e a segunda mediante ao uso de sistemas de cogeração de energia. No caso das células combustíveis o mecanismo para produção de energia elétrica se dá por meio da eletroquímica, não necessitando de realização de trabalho mecânico, o que evita perdas significativas de energia e confere a esta tecnologia rendimentos em até 70%, cerca de 40% superior às tecnologias convencionais (DENG *et al.*, 2020). O uso desta tecnologia, no entanto além de ser incipiente, exige padrões de qualidade acima dos requeridos pelo biometano o que foge do nosso escopo de aplicação, não sendo, portanto, explorada neste capítulo.

Já a cogeração de energia consiste na geração simultânea de energia térmica e elétrica o que aumenta o aproveitamento energético global do sistema para até 80- 90% da potência térmica nominal (PROBIOGAS, 2010). Essa estratégia é amplamente utilizada nas plantas de biogás pois permite que a demanda energética da planta seja suprida pela geração de energia elétrica enquanto o calor gerado pode ser aproveitado no aquecimento de equipamentos por meio de água aquecida ou vapor, ou mesmo resfriamento com o uso de *chillers* (CIBIOGAS, 2020b).

As estratégias de cogeração ainda podem ser divididas de acordo com a prioridade de conversão energética apresentando-se como ciclos *topping* ou *bottoming*. Os ciclos *topping* priorizam a geração de energia elétrica e/ou mecânica, reaproveitando o calor útil liberado durante a geração. Correspondem à maior parte das configurações utilizadas nas plantas de biogás e são representados por tecnologias como motores de combustão interna e turbinas/microturbinas a gás. Por outro lado, os ciclos *bottoming* priorizam a geração de calor útil, geralmente na forma de vapor, para posteriormente aproveitar sua energia residual na geração de energia elétrica. São representados pelas turbinas a vapor e encontram menor

aplicação, devido ao calor residual gerado pelos processos industriais e por geralmente não se encontrarem em condições suficientes para sua pronta conversão em energia elétrica (CIBIOGAS, 2020b).

A seguir são abordadas mais detalhadamente as tecnologias supracitadas para cogeração de energia a partir do biogás.

#### 2.3.2.5.1 *Motores de combustão interna*

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas que utilizam a energia liberada durante a queima de um combustível para geração de trabalho mecânico através do movimento de pistões dentro dos cilindros de combustão (GONÇALVES, 2017). Podem ser encontrados sob os modelos de ciclo Otto ou ciclo diesel e geralmente operaram em quatro etapas conhecidas como: admissão, compressão, explosão e exaustão (RAMOS; SILVA, 2009).

- i. **Admissão**: A primeira etapa se inicia quando o pistão se encontra no ponto morto superior. Nesse momento o pistão desce até o ponto morto inferior e a válvula de admissão se abre permitindo a entrada de uma mistura formada por ar e combustível, neste caso o biogás, que fluem para dentro do cilindro devido à pressão negativa.
- ii. **Compressão**: O pistão então sobe novamente até o ponto morto superior e como as válvulas agora se encontram fechadas, a mistura combustível é comprimida ao máximo dentro do cilindro, atingindo altas pressões e temperatura.
- iii. **Explosão**: Nessa etapa ocorre a reação de combustão entre o biogás e o oxigênio contido no ar, porém a maneira como ela se inicia varia do ciclo Otto para o ciclo diesel. No ciclo Otto, uma centelha é produzida causando a ignição, enquanto no ciclo diesel, uma válvula central adiciona um pouco de diesel que se realiza autoignição, devido à alta pressão e temperatura dentro do cilindro. Em ambos os casos, a combustão gera a expansão dos gases que empurra o pistão novamente para baixo obrigando-o a voltar ao ponto morto inferior.
- iv. **Exaustão**: Por fim, o pistão sobe novamente enquanto abre-se a válvula de escape, permitindo que os gases residuais na combustão sejam empurrados pelo pistão e saiam do cilindro. Quando o pistão atinge o ponto morto superior, a válvula de escape se fecha e a de admissão se abre iniciando novamente o ciclo.

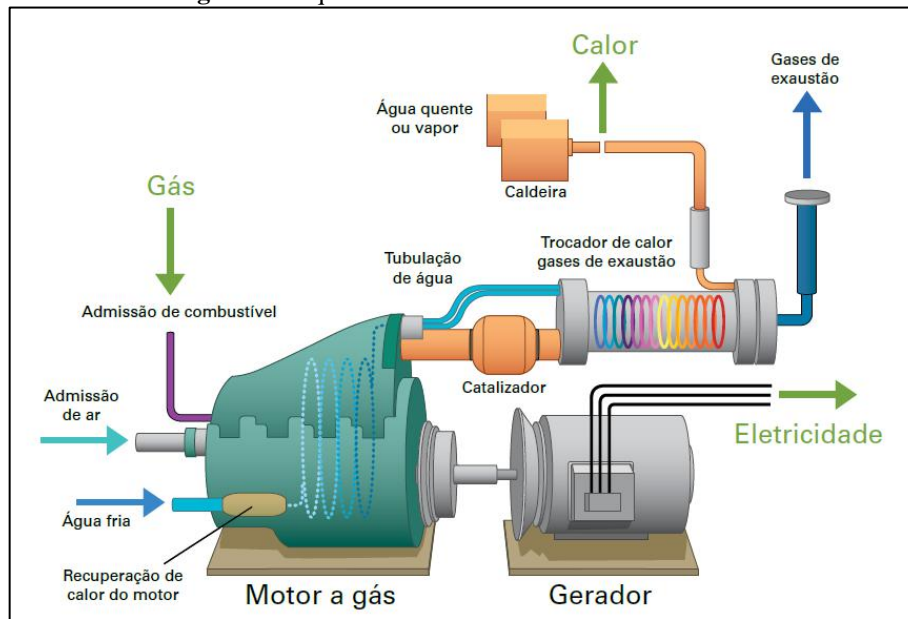


A energia elétrica é produzida quando um gerador é acoplado ao motor. Neste caso os pistões estão conectados a um eixo que gira conforme o seu movimento. Este eixo por sua vez também está conectado ao gerador que transforma essa energia mecânica em eletricidade. Já a cogeração de energia se dá pelo aproveitamento térmico dos gases de exaustão ou dos fluidos de refrigeração e lubrificação que podem ser utilizados para aquecimento ou geração de vapor (GONÇALVES, 2017).

Atualmente os motores ciclo Otto vem conquistando cada vez mais espaço nas usinas de biogás. Seu rendimento elétrico, variando entre 34 a 45%, é ligeiramente superior ao ciclo diesel e bem superior ao dos outros sistemas a combustão que possuem em média entre 20 - 30% de eficiência. Esse motor também apresenta uma série de vantagens quando comparado aos do ciclo diesel, como queima menos poluente, menor custo de manutenção, ausência de necessidade de diesel para ignição, além da sua concepção. Enquanto os motores a diesel foram construídos para trabalhar com combustível líquido, necessitando de algumas adaptações, os motores ciclo Otto foram desenvolvidos desde originalmente para funcionarem a gás (PROBIOGAS, 2010; FEAM, 2015). A figura 9 exibe a configuração geral de um motor de combustão interna.

Todos esses fatores tornam os motores ciclo Otto a tecnologia de preferência nas plantas de pequena e média escala, onde geralmente a potência instalada é menor que 500kW o que inviabiliza a aquisição e uso de equipamentos como turbinas a vapor ou turbinas a gás (CIBIOGAS, 2020b)

**Figura 9:** Esquema de um motor de combustão interna



**Fonte:** FEAM, 2015

#### 2.3.2.5.2 *Turbinas e microturbinas a gás*

As turbinas e microturbinas a gás são máquinas térmicas que operam segundo o princípio termodinâmico do Ciclo de Brayton, aproveitando a energia térmica liberada na combustão de uma mistura gasosa para geração de trabalho mecânico. São compostas por um conjunto de três equipamentos: compressor, câmara de combustão, além da turbina propriamente dita, e seu funcionamento é dividido em três etapas (GONÇALVEZ, 2017; RAMOS e SILVA, 2009):

- i. Em um primeiro momento, o ar em condições atmosféricas é comprimido a pressões de 5 a 8 atm e direcionado para câmara de combustão onde o combustível, nesse caso o biogás, também está sendo injetado.
- ii. Dentro da câmara de combustão, o oxigênio do ar pressurizado e o biogás reagem entrando em combustão, que ocorre a pressão constante elevando a temperatura da mistura gasosa a valores entre 650 e 1200°C.
- iii. Essa mistura gasosa a altas temperatura e pressão é encaminhada a uma turbina onde se expandem devido à diferença de pressão, movendo as pás da turbina e consequentemente o seu eixo, gerando energia mecânica suficiente para acionar o compressor e, quando conectado a um gerador, energia elétrica.

A cogeração de energia ocorre com o reaproveitamento do calor nos gases de exaustão que saem da turbina a uma temperatura média de 500°C, podendo ser canalizados diretamente

num trocador de calor para aquecimento ou mesmo na produção de vapor para turbinas a vapor num ciclo combinado, aumentando sua eficiência elétrica para até 50% (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; YANAGIHARA, 201-).

Algumas das vantagens das turbinas a gás são a baixa emissão de poluentes e a possibilidade de aumentar seu rendimento, que geralmente fica na faixa de 30%. Isso é viável com a reutilização do calor dos gases exauridos num regenerador, pré-aquecendo o ar comprimido que entra na câmara de combustão. Entretanto, essas tecnologias possuem algumas desvantagens e limitações significativas, como a alta tensão mecânica devido às condições de operação, o que reduz sua vida útil, alta vibração e emissão de ruídos e a viabilidade somente em plantas de médio a grande porte (DEUBLEIN e STEINHAUSER,2008; GONÇALVES, 2017; YANAGIHARA, 201-).

Nesse sentido, uma tecnologia que vem ganhando bastante destaque são as microturbinas que operam essencialmente da mesma maneira que as turbinas convencionais, porém em dimensões reduzidas. Dessa forma a vibração e emissão de ruídos é bastante inferior não requerendo gastos com proteção acústica ou reforço de estrutura. Além disso, esses sistemas são projetados para fornecer entre 25- 300 kW, o que viabiliza o seu uso para geração de energia elétrica em plantas pequenas. Cabe ressaltar, contudo, que a redução nas dimensões e condições de operação geram como contraponto uma baixa eficiência elétrica, fazendo com que as microturbinas consigam alcançar apenas 15 - 25% de rendimento caso operem sem ciclo regenerativo (DEUBLEIN; STEINHAUSER,2008; GONÇALVES, 2017; DENG *et al.*, 2020).

#### 2.3.2.5.3 Turbinas a vapor

As turbinas a vapor operam através do princípio termodinâmico do ciclo de Rankine, onde um fluido de trabalho, neste caso a água, muda de estado físico continuamente num ciclo fechado, convertendo parte do seu calor em trabalho mecânico. O processo como um todo pode ser descrito em quatro etapas (CIBIOGAS, 2020; CONNOR, 2020):

- i. Em um primeiro momento a água em estado líquido passa por uma bomba, onde é comprimida elevando sua pressão e sendo direcionada para uma caldeira mantida à alta temperatura por uma fonte de energia externa, neste caso a combustão direta do biogás.

- ii. A caldeira troca calor com o fluido fornecendo energia suficiente para que este mude de fase, transformando a água líquida em vapor superaquecido que é então direcionado a uma turbina.
- iii. O vapor superaquecido se encontra em altas pressão e temperatura, e ao entrar na turbina, se expande devido à diferença de pressão, movimentando suas pás móveis gerando assim a transformação da energia térmica em mecânica ou mesmo elétrica caso o eixo da turbina esteja acoplado a um gerador.
- iv. O fluido já exaurido após sua expansão é direcionado a um condensador onde retorna a sua fase líquida reiniciando o ciclo.

O uso de turbinas a vapor para geração de energia elétrica só viável em usinas com potência instalada acima de 20MW (CIBIOGAS 2020b). Se comparadas às tecnologias anteriores, pode-se notar que as turbinas a vapor apresentam uma eficiência global inferior, uma vez que não se pode reaproveitar o calor perdido durante a expansão do fluido no interior da turbina (DENG *et al.*, 2020).

## 2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS DA REVISÃO DA LITERATURA

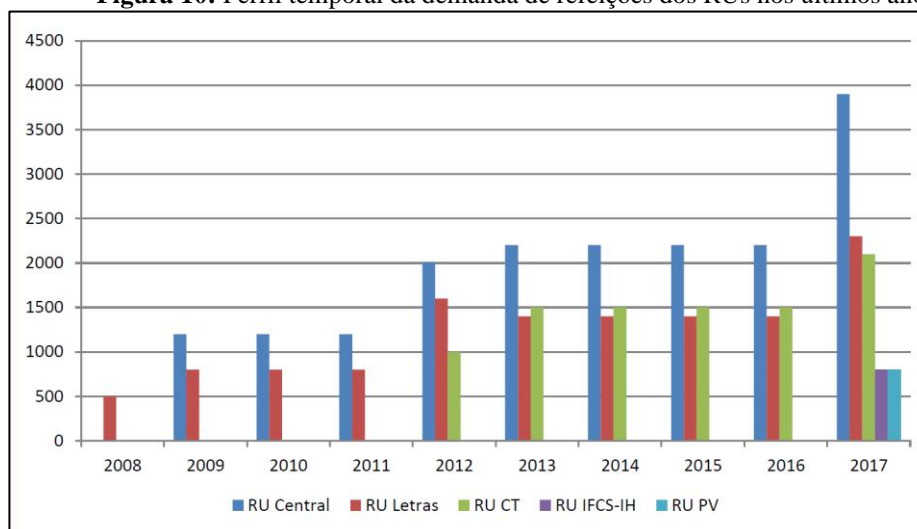
Neste capítulo buscou-se fazer uma revisão ampla sobre a produção do biogás, abordando o assunto desde a natureza do processo até seus aspectos tecnológicos. A compreensão do estado da arte da produção de biogás, envolvendo, sobretudo, das tecnologias envolvidas, condições operacionais, equipamentos, condução do processo, sistemas de geração de energia, entre outros, deu suporte à diversas tomadas de decisão para desenvolver a proposta da planta apresentada no presente trabalho, que tem como foco o aproveitamento dos resíduos gerados no restaurante universitário central da UFRJ, cenário de estudo que será abordado no Capítulo 3.

### 3 CENÁRIO DE ESTUDO

O restaurante universitário central da UFRJ (RU Central) localiza-se dentro do campus da Ilha do Fundão, e é atualmente o maior RU da Universidade que ainda conta com as unidades Centro de Tecnologia (RU CT), Letras (RU Letras), Instituto de Filosofia e Ciências Sociais (RU IFCS-IH) e campus da Praia Vermelha (RU PV) (UFRJ, 2018; MOURA, 2017).

O RU Central começou suas operações em 2009, na época, limitando-se a servir apenas 1200 refeições por dia, até então preparadas fora da Universidade para serem distribuídas no horário de almoço. Essa dinâmica mudou em 2013 com a centralização dos serviços dentro do próprio RU Central, que passou a ser responsável pelo preparo e distribuição de todas as refeições servidas dentro dele e pelas demais unidades da rede, chegando a produzir no mesmo ano, entre almoço e jantar, mais de 5000 refeições diárias. Nos dias atuais, o restaurante conta com nada menos do que 200 profissionais que atuam para garantir o preparo de aproximadamente 10.000 refeições, das quais cerca de 4.000 são consumidas na própria unidade, enquanto o restante é distribuído para as demais unidades (UFRJ, 2018; MOURA, 2017). A Figura 10 mostra a evolução na demanda por refeições nos últimos anos.

**Figura 10:** Perfil temporal da demanda de refeições dos RUs nos últimos anos



Fonte: UFRJ (2018)

Para ser capaz de suprir toda esta demanda, o restaurante funciona 24 horas por dia, dividindo suas tarefas em um ciclo composto por 8 etapas:

- ❖ Recepção: Recebimento e avaliação das condições dos alimentos.
- ❖ Armazenamento: Guarda dos alimentos em equipamentos e temperatura apropriada até o começo das atividades de pré-preparo.

- ❖ Pré-preparo: Começo da preparação com higienização e corte dos alimentos. Avaliação das perdas gerada durante o processo.
- ❖ Preparo: Cocção e análise sensorial das guarnições preparadas
- ❖ Envase: Distribuição das preparações nas cubas de aço (GNs) e aferição do seu peso.
- ❖ Manutenção: Conservação dos alimentos dentro de *pass throughs*, aquecidos e refrigerados. Controle da temperatura do balcão quente (banho maria)
- ❖ Distribuição: Porcionamento e distribuição das refeições às pessoas, coleta de amostras e transporte das refeições para outras unidades
- ❖ Higienização: Limpeza dos recipientes, louças e demais itens e equipamentos utilizados

Todo esse processo gera uma grande quantidade de resíduos alimentares que atualmente são apenas destinados ao aterro sanitário, desperdiçando seu potencial energético, além de onerar a universidade com os custos envolvidos na sua disposição.

O RU Central forma portanto um cenário perfeito para um estudo de viabilidade de uma planta de biogás, na medida em que consiste num grande gerador de matéria orgânica diária, podendo se beneficiar tanto diretamente do biogás produzido, com o fornecimento de calor para suas atividades de cocção e aquecimento ou mesmo indiretamente, com economia dos gastos envolvidos no transporte e disposição dos resíduos alimentares em aterro.

## 4 METODOLOGIA

Como abordado, o projeto de uma planta de biogás é bastante complexo envolvendo diversas etapas, equipamentos e tomadas de decisões técnicas. Para facilitar a sua consecução será utilizado, portanto, o simulador *SuperPro Designer*® (SPD) v.8.5 que permitirá avaliar cada passo do nosso fluxo de processos de se obter um resultado mais próximo à realidade. Antes, porém, é preciso que algumas informações sejam obtidas para alimentar o sistema, como as características do substrato e alguns parâmetros de projeto do digestor.

### 4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DO SUBSTRATO

O conhecimento da composição e disponibilidade do substrato são elementos chave para a produção de biogás. Neste trabalho, devido à impossibilidade de se realizar análises quantitativas e qualitativas em campo, esses dados foram obtidos de estudos anteriores que tiveram como base o mesmo cenário analisado.

A composição do substrato foi extraída de Alves, I. e se encontra na Tabela 4 (2016). A autora realizou em sua pesquisa a caracterização química dos resíduos gerados pelo RU Central, visando seu uso na codigestão com lodo de esgoto para produção de biogás. Os valores encontrados foram confrontados com os da literatura existente, tendo sido considerados satisfatórios e validados. Chamam a atenção, principalmente o alto percentual de sólidos voláteis (% SV) e boa relação C/N, indicando uma grande biodegradabilidade da matéria orgânica em questão.

**Tabela 3:** Caracterização química dos resíduos alimentares do RU

PARÂMETROS	RESÍDUO ALIMENTAR
Umidade (%)	72,6
ST (%)	27,4
SV/ST (%)	96,9
Carboidratos (%SV)	43,5
Proteínas (%SV)	18,4
C/N	18

Fonte: Adaptado de ALVES, I. (2016)

Quanto a disponibilidade de substrato, a quantificação dos resíduos alimentares gerados pelo RU Central foi realizada por Moura (2017), sendo exibida na Tabela 5. A autora montou um inventário dividindo os resíduos como pré-preparo, sobras limpas (quando o alimento é preparado, porém não é consumido) e ingesta, aqueles gerados após o consumo da refeição. O

espaço amostral utilizado foi de 20 dias, ocorridos em meados do período letivo, incluindo-se também os finais de semana, procurando representar de maneira fielmente o fluxo do RU na maior parte do ano.

**Tabela 4:** Estimativa da geração de resíduos alimentares (kg/dia)

JANTAR				JANTAR E ALMOÇO
Pré-preparo	Sobra Limpa	Resto-ingesta	Total	Total Acumulado
104	90	68	282	786

Fonte: MOURA (2017)

#### 4.2 DEFINIÇÃO DO VOLUME DO REATOR E TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICA

O cálculo do volume do digestor e a definição do tempo de retenção hidráulica são dois dos aspectos mais importante numa planta de biogás, uma vez que impactam diretamente no tempo e no custo do processo produtivo. Como visto ao longo da revisão da literatura, o volume do digestor pode ser definido em função de dois parâmetros, TRH e/ou COV, podendo se utilizar ambos como fator de decisão ou apenas um isoladamente.

O *SuperPro Designer*® é capaz de calcular o volume do digestor através do TRH, entretanto, apenas o uso deste parâmetro acaba retornando valores de COV muito superiores ao que se constata na realidade. Portanto, optou-se por calcular o volume do digestor em função da COV, utilizando-se o valor obtido para o cálculo do TRH. As equações 4.1 e 4.2 utilizadas foram extraídas de Talia (2018) e estão representadas logo abaixo:

$$V_{COV} = \frac{Q_{sub} \times 1000 \times ST \times SV}{COV} \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$V_{HRT} = Q_{tot} \times TRH \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde:

$V_{cov}$ [kg <sub>vs</sub> /m <sup>3</sup> d]	Volume útil do digestor de acordo com a COV alvo
$Q_{sub}$ [t/d]	Quantidade diária total de substrato alimentada no digestor
ST [%]	Concentração de sólidos totais do substrato
VS [%]	Concentração de sólidos voláteis do substrato
$V_{HTR}$ [m <sup>3</sup> ]	Volume útil do digestor de acordo com o HRT alvo
$Q_{tot}$ [ m <sup>3</sup> /d]	Quantidade diária total alimentada no digestor, incluindo eventual diluição



### 4.3 SUPERPRO DESIGNER

O *SuperPro Designer*® é um software de simulação utilizado na modelagem, avaliação e otimização de processos de um gama de áreas industriais como biotecnologia, farmacêutica, alimentos, metalúrgica, tratamento de resíduos e etc. Presente hoje em mais de 500 companhias e 1000 universidades, o programa permite simular processos nos modos batelada e contínuo, realizando todo o balanço material e de energia das correntes e operações envolvidas (INTELLIGEN,2021) .

Dentre seus principais recursos destacam-se :

- ❖ Modelos para mais de 80 equipamentos/ operações
- ❖ Dimensionamento e precificação dos equipamentos
- ❖ Análise econômica
- ❖ Análise de impacto ambiental de emissões fugitivas
- ❖ Extenso banco de dados para substâncias químicas e misturas

Desta forma, o SPD se encaixa perfeitamente na proposta deste trabalho, auxiliando na elaboração e análise de viabilidade do projeto da planta de biogás.

#### 4.3.1 Etapas de simulação no SuperPro Designer

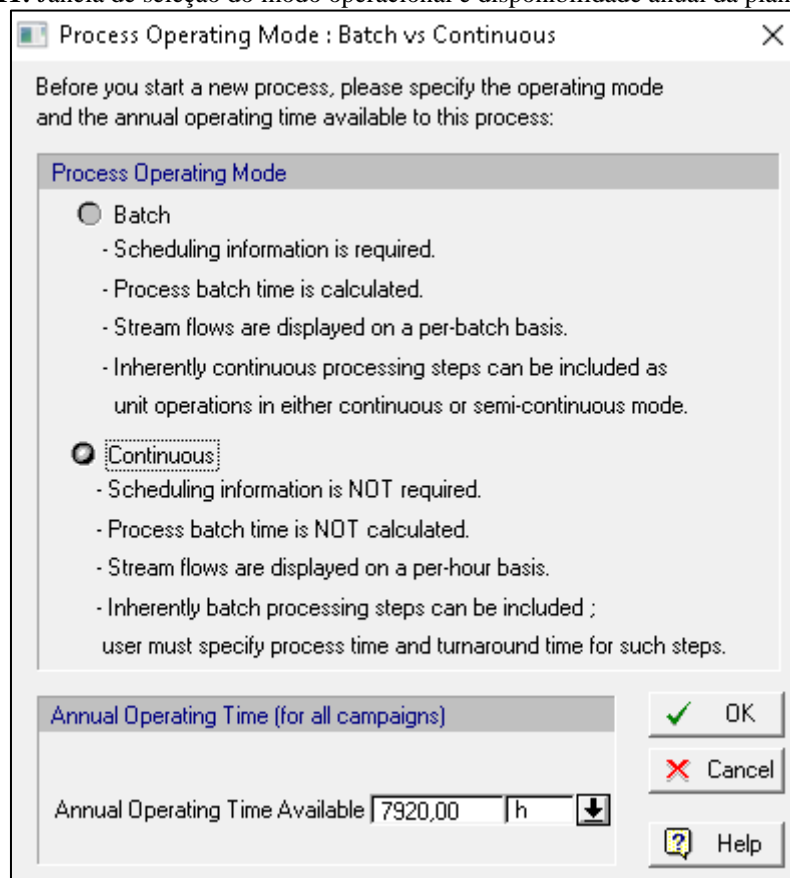
Após o conhecimento levantado com a revisão da literatura, decidiu-se pela simulação de uma planta de biogás operando em sistema monofásico, via úmida com 15% de ST e a 37°C, com o seu desenvolvimento dentro do SPD, se dando nas seguintes etapas:

- i. 1.Escolha do modo de operação
- ii. 2.Seleção do(s) modelo(s) do processo
- iii. 3.Registro de todas os componentes e misturas que participarão do processo
- iv. 4.Seleção e configuração dos equipamentos e operações

##### 4.3.1.1 Escolha do modo de operação

A escolha do modo de operação geral da planta é a primeira pergunta que o programa faz ao usuário, tão logo se inicie um novo processo. O programa oferece como opções os modos batelada (em inglês, *batch*) e contínuo (em inglês, *continuous*), além de permitir que o usuário indique o tempo operacional anual disponível para todo o processo, como ilustrado na figura 11:

**Figura 11:** Janela de seleção do modo operacional e disponibilidade anual da planta



**Fonte:** *SuperPro Designer*®

Se a opção for pelo processo em batelada, algumas informações adicionais referentes ao tempo e agendamento de cada operação são necessárias, o que interfere também nos equipamentos, que passam a requerer a adição e configuração de cada etapa operacional para executarem suas tarefas, ou seja, para que ocorra uma operação completa no reator passa a ser necessário que se adicione minimamente as etapas de carga, reação e descarga no equipamento.

O modo contínuo, por outro lado, independe de agendamento, além de considerar cada equipamento como uma operação completa, sendo apenas necessária a sua configuração.

No caso específico deste trabalho, foram levados em consideração a disponibilidade diária do substrato, o regime das principais tecnologias utilizadas para digestão resíduos alimentares atualmente, bem como o objetivo de um fornecimento constante de biogás para aproveitamento energético, o que resultou na escolha do modo contínuo. Além disso, optou-se pelo tempo operacional padrão de 7920 horas ou 330 dias que já leva em conta possíveis paradas devido a contratempos e/ou manutenção.

#### 4.3.1.2 Seleção do modelo do processo:

Embora o manual do SPD indique o registro de componentes como etapa imediatamente posterior a seleção do modo de operação, a escolha prévia do modelo reacional a ser utilizado se faz necessária, uma vez que é a partir dele que serão conhecidas as substâncias que comporão as reações do sistema.

No caso da digestão anaeróbia, o SPD oferece a possibilidade de se modelar o processo por duas formas, estequiométrica ou cinética. A modelagem estequiométrica é a mais simples e consiste na adição das equações de reação do modelo previamente selecionado, podendo o seu balanceamento ser realizado por coeficiente molar ou mássico. Já a modelagem cinética, além da adição da estequiometria do processo, envolve também a entrada dos parâmetros cinéticos, que variam de acordo com o equipamento selecionado. A comparação entre ambas as configurações para um digestor é mostrada nas figuras 12 e 13:

**Figura 12:** Janela para inserção do balanço estequiométrico das reações

Reactants				
	Component	Molar Coeff.	MW	Mass Coeff.
1	Carbohydrates	1,0000	162,140	162,1400
2	Water	1,0000	18,015	18,0150

Total Mass: 180,1550

Products				
	Component	Molar Coeff.	MW	Mass Coeff.
1	Glucose	1,0000	180,157	180,1570

Total Mass: 180,1570

Stoichiometric Coefficients:  Mass  Molar

OK Cancel Help

Fonte: SuperPro Designer®



(MEL *et al.*, 2015; GEBRESLASE, GEBRIHET, ATSBHA, 2018) utilizam a abordagem estequiométrica, e, portanto, optou-se por seguir a mesma solução uma vez que era a única que apresentava referências mais completas.

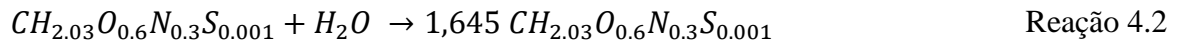
As equações utilizadas para a modelagem estequiométrica do digestor se encontram em sua maioria no APÊNDICE I: MODELO DE BIOCONVERSÃO ANAERÓBIA, que faz uma breve revisão e explanação do modelo utilizado. As reações de hidrólise e acidogênese dos açúcares foram ajustadas conforme Gebreslase, Gebrihet, Atsbha (2018), enquanto a reação de acetogênese do valerato teve seus coeficientes molares corrigidos, uma vez que não se encontrava balanceada. A estequiometria completa pode ser conferida a seguir:

### 1. Etapa de Hidrólise:

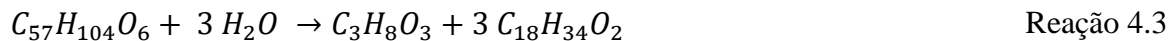
Hidrólise dos carboidratos



Hidrólise das proteínas

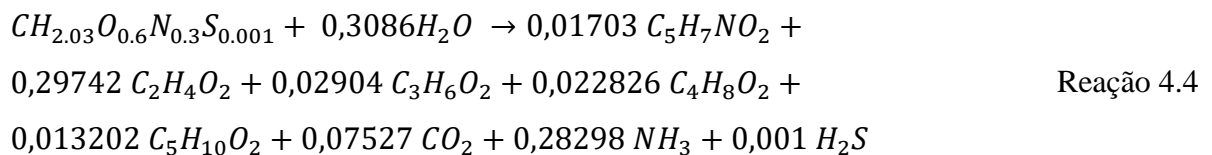


Hidrólise dos Lipídeos

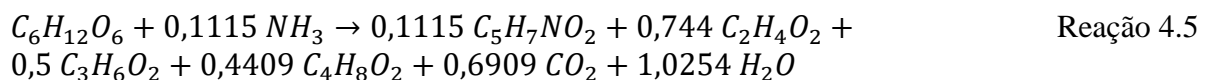


### 2. Etapa de Acidogênese:

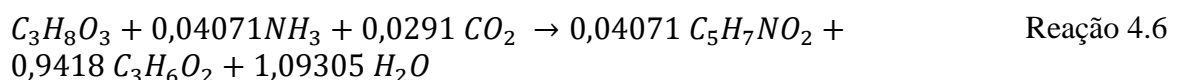
Acidogênese dos aminoácidos



Acidogênese dos açúcares

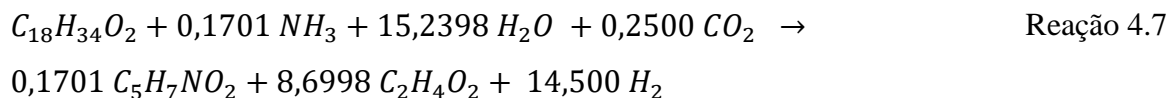


Acidogênese do glicerol

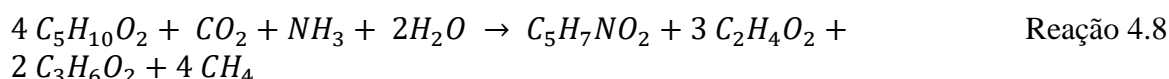


### 3. Etapa de Acetogênese:

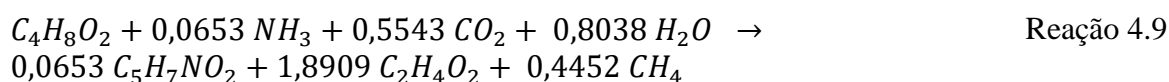
Acetogênese do ácido oleico



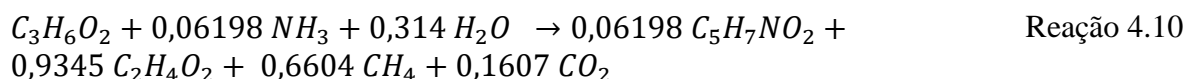
Acetogênese do ácido valérico:



Acetogênese do ácido butírico:

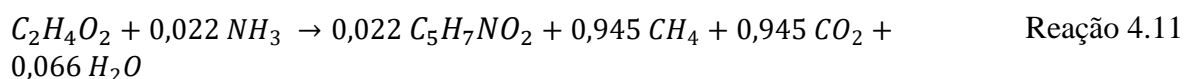


Acetogênese do ácido propiônico:

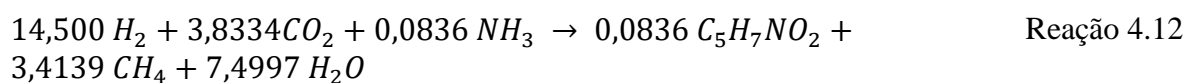


### 4. Etapa de Metanogênese:

Metanogênese acetoclástica



Metanogênese hidrogenotrófica:



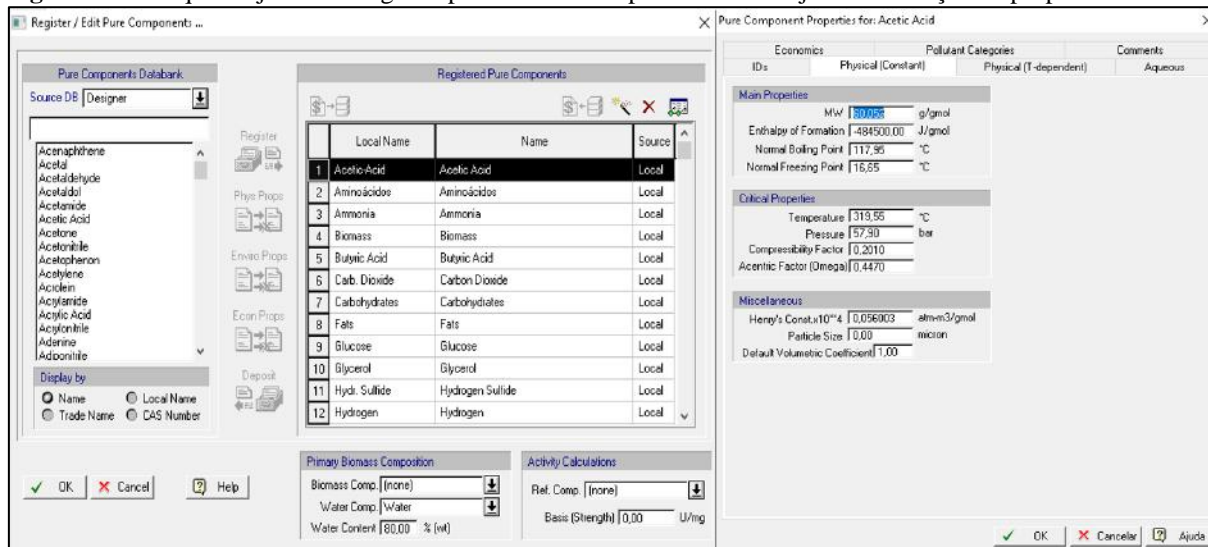
#### 4.3.1.3 Registro de componentes e misturas

Conhecidos os componentes que participarão das reações, a próxima etapa consiste no seu registro no processo. O SPD permite que as substâncias sejam registradas como puras ou misturas possuindo um banco de dados que já inclui cadastradas 530 substâncias puras comuns na indústria e uma mistura (ar).

O programa também possibilita a criação de novas substâncias e misturas, além da edição do conteúdo padrão já cadastrado em seu banco de dados, podendo-se alterar suas

propriedades físicas, parâmetros ambientais, incluir dados econômicos e etc., como demonstrado na Figura 14

**Figura 14:** À esquerda janela de registro para substâncias puras. À direita janela de edição de propriedades.



**Fonte:** SuperPro Designer®

Para o uso do modelo foi necessária a criação de algumas substâncias além da edição de algumas já cadastradas no banco de dado do SPD. Ressalta-se que para efeitos de balanço estequiométrico o programa não avalia a fórmula molecular da substância, sendo necessária apenas a inclusão do seu peso molecular correto. As substâncias, fórmulas e peso molecular utilizados são descritos no Quadros 6,7 e 8. No caso do enxofre (S) e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> seu uso será abordado mais à frente na parte de equipamentos.

**Quadro 6:** Substâncias puras utilizadas na simulação

Substância	Situação	Fórmula Molecular	Peso Mol. (g/gmol)
Ácido acético	Importado do SPD	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	60,052
Ácido butírico	Importado do SPD	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88,106
Ácido oleico	Importado do SPD	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	282,467
Ácido propiônico	Importado do SPD	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	74,08
Ácido sulfúrico	Importado do SPD	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98,073
Ácido valérico	Criado	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	102,133
Água	Importado do SPD	H <sub>2</sub> O	18,015
Aminoácidos	Criado	CH <sub>2,03</sub> O <sub>0,6</sub> N <sub>0,3</sub> S <sub>0,001</sub>	27,89
Amônia	Criado	NH <sub>3</sub>	17,03
Biomassa	Modificado	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	113,116
Carboidratos	Modificado	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	162,14
Dióxido de carbono	Importado do SPD	CO <sub>2</sub>	44,01

**Fonte:** SuperPro Designer®

**Quadro 7:** Continuação das substâncias puras utilizadas na simulação

Substância	Situação	Fórmula Molecular	Peso Mol. (g/gmol)
Enxofre	Importado do SPD	S	32,06
Glicose	Importado do SPD	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	180,157
Glicerol	Importado do SPD	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	92,094
Hidrogênio	Importado do SPD	H <sub>2</sub>	2,016
Lipídeos	Modificado	C <sub>57</sub> H <sub>104</sub> O <sub>6</sub>	885,453
Metano	Importado do SPD	CH <sub>4</sub>	16,043
Nitrogênio	Importado do SPD	N <sub>2</sub>	28,013
Oxigênio	Importado do SPD	O <sub>2</sub>	31,999
Proteínas	Modificado	CH <sub>2,03</sub> O <sub>0,6</sub> N <sub>0,3</sub> S <sub>0,001</sub>	27,89
Sulfeto de Hidrogênio	Importado do SPD	H <sub>2</sub> S	34,082

Fonte: SuperPro Designer®

**Quadro 8:** Misturas utilizadas na simulação

Componente	Situação	Composição
Ar	Importado do SPD	76,7 % N <sub>2</sub> , 23,3% O <sub>2</sub>

Fonte: SuperPro Designer®

#### 4.3.1.4 Seleção e configuração dos equipamentos e operações

Finda a etapa de registro dos componentes, pode-se avançar para o desenho do processo, adicionando-se os equipamentos, chamados no SPD de “Unit Procedures” e suas configurações.

Como ressaltado, de acordo com o modo de operação escolhido há diferenças em como prosseguir nesta etapa. Caso a opção feita tenha sido pela condução do processo em batelada, os equipamentos irão requerer a adição de operações além da sua configuração. Caso a opção feita tenha sido pela condução em processo contínuo, o programa considera cada equipamento equivalente as próprias operações que nele ocorrem, bastando apenas sua configuração.

##### 4.3.1.4.1 Triturador

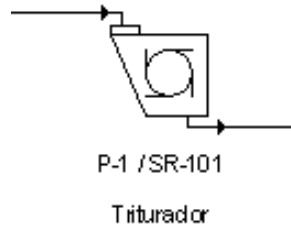
Idealizando a construção de uma planta na área do próprio RU Central, não há necessidade de transporte do substrato. Desta forma, como a etapa de triagem também não é considerada como uma operação pelo sistema, iniciou-se o processo com a redução das partículas do substrato, que como vimos, é uma etapa de pré-tratamento essencial em se tratando de resíduos alimentares.

Assim, o primeiro equipamento no nosso fluxo de processos é um triturador (Figura 15), que receberia os resíduos alimentares após sua triagem, reduzindo suas partículas de modo a melhorar sua digestibilidade. Essa operação no SPD não requer muitas configurações, havendo



somente a possibilidade de escolher a quantidade de energia consumida. No nosso caso, optou-se por deixar o valor padrão de 0,05kW (kg/h), sendo a mesma da corrente de entrada.

**Figura 15:** Triturador

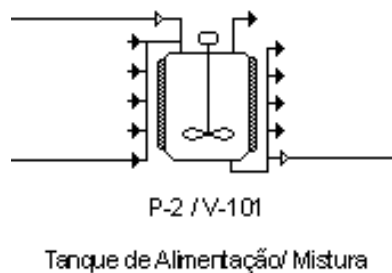


**Fonte:** SuperPro Designer®

#### 4.3.1.4.2 Tanque da alimentação/Mistura

Após o pré-tratamento, o substrato segue para o tanque de alimentação (Figura 16), onde ocorre a adição de água e homogeneização. O TRH escolhido foi de uma hora, uma vez que valores acima disso poderiam levar ao início da digestão anaeróbia dentro do próprio tanque. A temperatura e pressão foram mantidas em condição ambiente, respectivamente 25°C e 1 atm, enquanto que a taxa de consumo de energia na agitação foi de 0,0065 kW/m<sup>3</sup>, a mesma utilizada posteriormente no digestor. O volume do equipamento foi dimensionado pelo próprio programa em função da vazão e do TRH, configurando apenas 90% do volume total como volume útil.

**Figura 16:** Tanque de alimentação/Mistura do digestor

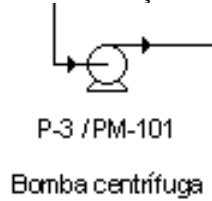


**Fonte:** SuperPro Designer®

#### 4.3.1.4.3 Bomba de alimentação do digestor

Para realizar o transporte da corrente do tanque de alimentação ao digestor, optou-se por uma bomba centrífuga comum (Figura 17). A variação de pressão foi na ordem de 0,1 atm e os valores de consumo energético foram calculados pelo programa com base numa eficiência padrão do equipamento de 70%.

**Figura 17:** Bomba de alimentação do Digestor



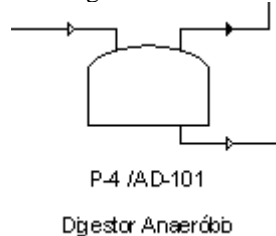
**Fonte:** *SuperPro Designer*®

#### 4.3.1.4.4 Digestor

Após a revisão da literatura, optou-se por utilizar como digestor um modelo CSTR. O SPD fornece uma opção própria de equipamento para a realização da digestão anaeróbia, embora não haja a possibilidade de diferenciar o modelo, como por exemplo UASB. Como reatores CSTR e fluxo pistonado são comuns em diversas aplicações, não restringindo-se somente a digestão anaeróbia, o programa também oferece a opção de utilizá-los, porém não fornece certas informações específicas como por exemplo, tempo de residência do lodo. Portanto, embora os parâmetros tenham sido escolhidos pensando-se em um digestor CSTR, o equipamento selecionado foi o digestor padrão, fornecido pelo programa.

Diferentemente do tanque de alimentação, onde utilizou-se o “*Design Mode*”, opção padrão onde o programa dimensiona os equipamentos, para o digestor foi usado o “*Rating Mode*”, onde o próprio usuário é quem fornece as medidas. Nesse sentido, os valores inseridos no volume do digestor, bem como seu TRH foram os resultados obtidos a partir das equações 4.1 e 4.2, presentes na seção 4.2 “Definição do volume e TRH do digestor”, considerando um volume útil de 90%.

**Figura 18:** Digestor Anaeróbio



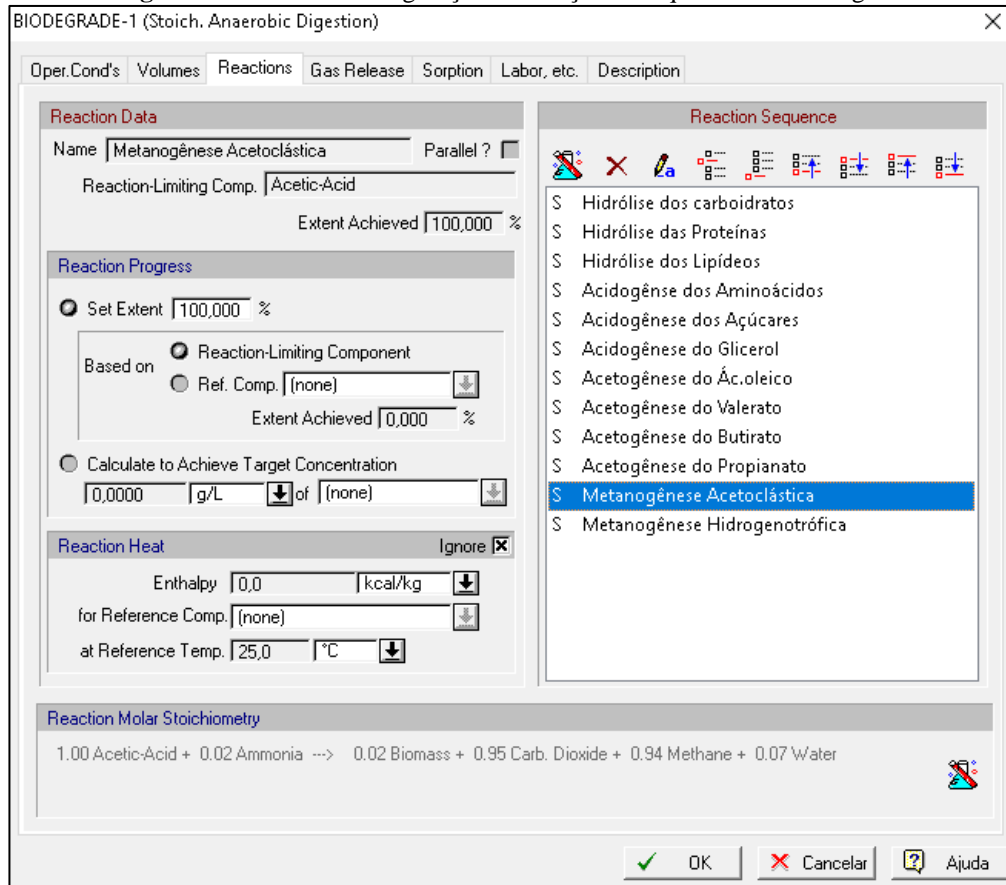
**Fonte:** *SuperPro Designer*®

A temperatura do processo foi de 37°C, mantendo-se as condições na faixa mesofílica, uma vez que esta é a mais utilizada devido às suas vantagens. Para isto, utilizou-se vapor como fonte de aquecimento do digestor, uma vez que a opção de água quente está padronizada em

40°C não podendo ser mudada. A pressão foi mantida a da linha (1,1 atm) e a agitação a numa relação de 0,0065kW/m<sup>3</sup> como recomendado pela revisão da literatura.

Por fim, como é no digestor onde ocorrem as reações, é nele que é inserido o modelo de digestão anaeróbia. Então, inseriu-se as reações conforme seção 4.3.1.2 “Seleção do(s) modelo(s) do processo”. No caso das reações estequiométricas é necessário também inserir o “*extent of reaction*” inicial, ou seja, o quanto se espera do componente limitante será convertido ao final da reação. Como não havia valores pré-estabelecidos na literatura, considerou-se que as reações ocorriam com o maior rendimento possível, inserindo, portanto, 100% como valor inicial, uma vez que o próprio programa calcula o “*extent of reaction*” real após fazer o balanço de massa e energia. A figura 19 mostra como ficou a configuração reacional do digestor.

**Figura 19:** Janela de configuração das reações estequiométrica no digestor



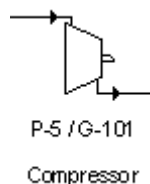
Fonte: SuperPro Designer®

#### 4.3.1.4.5 Compressor

O início do pós-tratamento do gás se inicia com a sua secagem. O biogás sai da linha e é comprimido a uma pressão de 11,8 atm, o equivalente aos 12 bar referenciados na literatura

para que ele saia pré-seco. A eficiência (70%) e o agente refrigerante (água fria à 25°C) foram deixadas como opção padrão do programa. A Figura 20 mostra o símbolo do compressor no fluxo de processos.

**Figura 20:** Compressor



**Fonte:** *SuperPro Designer*®

#### 4.3.1.4.6 Refrigeração

Seguindo a sequência de pós-tratamento do gás, o biogás é resfriado (Figura 21) para concluir sua etapa de secagem. A opção de fluido refrigerante utilizada foi água à 5°C e a temperatura de saída configurada foi a ambiente de 25°C.

**Figura 21:** Etapa de refrigeração do biogás

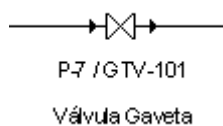


**Fonte:** *SuperPro Designer*®

#### 4.3.1.4.7 Válvula de alívio de pressão

Após sua secagem, o biogás ainda se encontra em uma pressão muito alta, sendo necessário uma queda de pressão. Para isto utilizou-se uma válvula gaveta, configurando a pressão de saída na linha para 1,1 atm, já pensando nas próximas etapas de dessulfurização e armazenamento.

**Figura 22:** Válvula do tipo gaveta

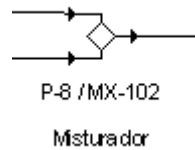


**Fonte:** *SuperPro Designer*®

#### 4.3.1.4.8 Misturador/ Biofiltro percolador

Após revisão da literatura, o sistema escolhido para dessulfurização do biogás foi o biofiltro percolador. Para sua montagem no SPD foi necessário dividi-lo em dois equipamentos, um misturador de correntes (Figura 23), que adiciona ar, e o filtro propriamente dito. Para o misturador de correntes configurou-se a vazão de ar como 8% da vazão volumétrica de biogás, conforme referenciado na revisão da literatura.

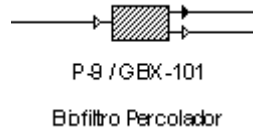
**Figura 23:** Misturador



**Fonte:** *SuperPro Designer*®

Para as configurações do filtro (Figura 24), utilizou-se as equações presentes no capítulo 2.3.2.3.2.1 “Remoção por tratamento biológico”, considerando-se que 75% do  $H_2S$  é removido na forma de enxofre elementar e 25% na de  $H_2SO_4$ , numa eficiência total de 98% conforme descritos na revisão da literatura.

**Figura 24:** Biofiltro percolador

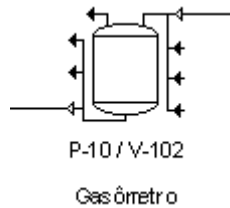


**Fonte:** *SuperPro Designer*®

#### 4.3.1.4.9 Gasômetro

Após a etapa de dessulfurização o biogás tratado é armazenado em um gasômetro de baixa pressão (Figura 25), mantendo a pressão que vinha da linha, de 1,1 atm. Já o seu volume foi dimensionado em 60% da vazão diária de biogás, conforme recomendado na revisão da literatura, uma vez que o aproveitamento energético do gás pode se dar tanto por queima direta quanto para geração de energia elétrica. Considerou-se volume útil de 90%.

**Figura 25:** Gasômetro de baixa pressão

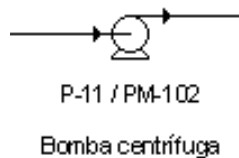


**Fonte:** *SuperPro Designer*®

#### 4.3.1.4.10 Bomba de remoção do digestato

A transferência do digestato para um tanque de armazenamento foi feita também por uma bomba centrífuga (Figura 26). As configurações foram as mesmas utilizadas na bomba de alimentação do digestor, ou seja, aumento de 0,1 atm na pressão e eficiência de 70%.

**Figura 26:** Bomba de remoção do substrato

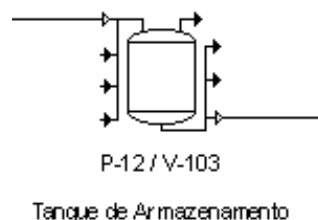


**Fonte:** *SuperPro Designer*®

#### 4.3.1.4.11 Tanque de armazenamento do digestato

Finalmente, para o armazenamento do digestato até a sua destinação para tratamento, optou-se por um tanque fechado comum (Figura 27). O equipamento foi dimensionado com um volume equivalente a sete vezes a vazão diária de digestato, de modo a suportar até uma semana de carga antes da destinação do digestato, considerando-se um volume útil de 90%.

**Figura 27:** Tanque de armazenamento do digestato



**Fonte:** *SuperPro Designer*®

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os cálculos a partir da metodologia para obtenção dos valores da corrente inicial de substrato e parâmetros usados para a configuração do reator. Também será feita uma análise e discussão da simulação no SPD bem como os resultados obtidos.

### 5.1 CORRENTE INICIAL DE SUBSTRATO, VOLUME DO DIGESTOR E TRH DO PROCESSO.

O cálculo da corrente inicial de substrato é feito a partir dos dados obtidos levantados nas tabelas 5 e 6, tem-se:

❖ Quantidade de sólidos totais diariamente gerados:

$$786 \text{ kg (Quantidade diária de resíduos alimentares gerados)} \times 0,274 \text{ (\% ST)} = \mathbf{215,36 \text{ kg/dia}}$$

❖ Quantidade de sólidos voláteis diariamente gerados:

$$215,36 \text{ kg (Quantidade diária de ST gerados)} \times 0,969 \text{ (\%SV/ST)} = \mathbf{208,68 \text{ kg/dia}}$$

Como carboidratos 43,5% (SV) e proteínas 18,4% (SV), logo:

❖ % SV de lipídeos

$$100 - 43,5 + 18,4 \text{ (\% de carboidratos + \% de proteínas)} = \mathbf{38,1 \text{ (\% SV)}}$$

Portanto, os valores de carboidrato, proteínas e lipídeos gerados diariamente serão:

❖ Carboidratos

$$208,68 \text{ kg (Quantidade de SV diário)} \times 0,435 \text{ (\% SV de carboidratos)} = \mathbf{90, 78 \text{ kg/dia}}$$

❖ Proteínas

$$208,68 \text{ kg (Quantidade de SV diário)} \times 0,184 \text{ (\% SV de proteínas)} = \mathbf{38,40 \text{ kg/dia}}$$

❖ Lipídeos

$$208,68 \text{ kg (Quantidade de SV diário)} \times 0,381 \text{ (\% SV de lipídeos)} = \mathbf{79,50 \text{ kg/dia}}$$

Como a operação se dá pela via úmida com 15% de ST, a quantidade de massa total diária será:

$$215,36 \text{ kg (Quantidade diária de ST)} / 0,15 \text{ (\% de ST)} = \mathbf{1435, 73 \text{ kg/dia}}$$

Subtraindo a quantidade de massa de ST, encontramos o total de umidade:

$$1435,73 \text{ kg (massa total diária do sistema)} - 215,36 \text{ kg (Quantidade diária de ST)} = \mathbf{1220,37 \text{ kg/dia}}$$

Porém, sabe-se que 72,6% dos nossos resíduos alimentares iniciais são água:

$$786 \text{ kg (Quantidade diária de resíduos alimentares gerados)} \times 0,726 \text{ (\% umidade)} = \mathbf{570,64 \text{ kg/dia}}$$

Portanto, pode-se calcular a quantidade de água adicionada para diluir o substrato a 15%, como a seguir:

❖ Quantidade de água adicionada na diluição

1220,37 kg (quantidade de água total após diluição) – 570,64 kg (quantidade de água já presente no substrato) = **649,73 kg/dia**

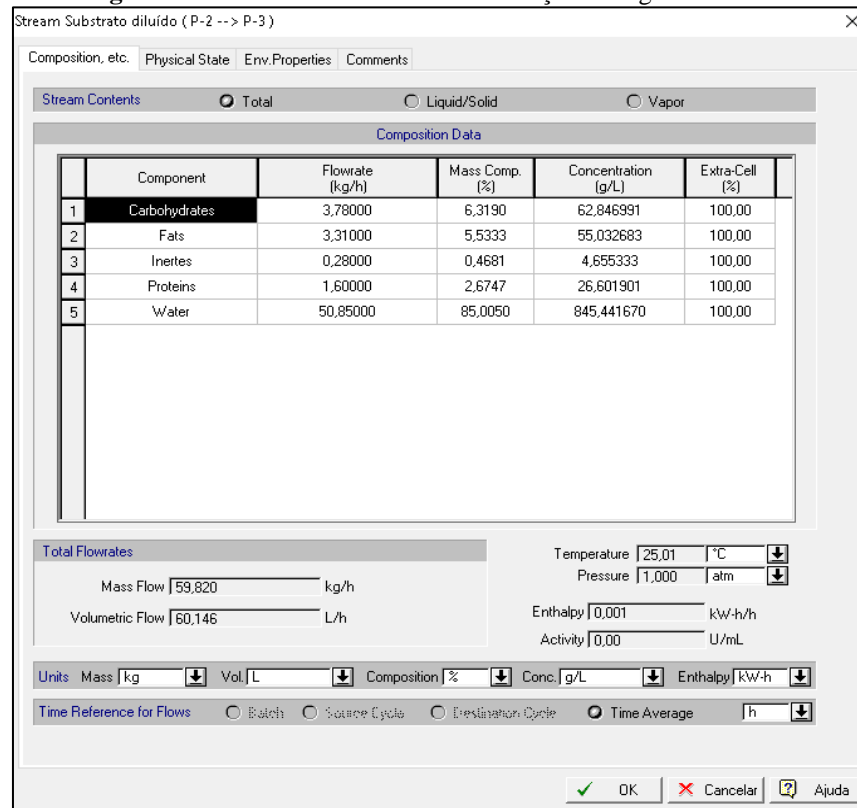
Como somente os sólidos voláteis representam a quantidade de matéria orgânica, e portanto, o que será convertido em biogás e digestato, tem-se que:

❖ Quantidade diária de inertes

215,36 kg (quantidade de diária de ST) – 208,68 kg (quantidade diária de SV) = **6,68 kg/dia**

Por fim, uma vez que no modelo contínuo os dados são dispostos em horas, basta fazer a conversão de dia para horas para serem obtidos os valores a serem introduzido no SPD. A figura 29 mostra os dados da corrente já diluída antes de ser alimentada ao digestor

**Figura 28:** Dados da corrente de alimentação do digestor



Fonte: SuperPro Designer®

Para o cálculo do volume do digestor e TRH do processo usamos as Equações 4.1 e 4.2. Como o digestor considerado para planta é o um reator CSTR e pela revisão da em que foi levantado que a COV máxima para estes digestores é de 5kgVS/m<sup>3</sup> dia, tem-se:



$$V_{cov} = \frac{0,786 \times 1000 \times 0,274 \times 0,969}{5} = 41 \text{ m}^3$$

E, portanto, para o TRH:

$$41 = 1,44 \times TRH = 28,5 \text{ dias}$$

Como considerou-se o volume útil como 90% do volume total, logo o volume total do digestor é:

$$V_{total} = \frac{41 \times 100}{90} = 45,5 \text{ m}^3$$

A Figura 30 mostra a janela para configuração volume do digestor e os resultados calculados pelo programa, corroborando com os valores encontrados.

**Figura 29:** Parâmetros configurados no digestor

Fonte: SuperPro Designer®

## 5.2 BALANÇO DOS MATERIAIS E CORRENTES

O resultado do balanço dos materiais e correntes envolvidos no processo são disponibilizados pelo SPD por meio de um relatório e podem ser conferidos no APÊNDICE II deste trabalho. É possível visualizar a quantidade total de material requerida para todo ano

operacional (330 dias), além das correntes e seus detalhes como pressão, temperatura, vazão mássica e volumétrica, enquanto que o esquema completo da planta se encontra no APÊNDICE III: FLUXOGRAMA DO PROCESSO.

### 5.3 ANÁLISE DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO

A simulação de uma planta de biogás no SPD se mostrou um grande desafio, tendo sido observados diversos contratempos ao longo do seu desenvolvimento.

Primeiramente, o uso da modelagem estequiométrica, apesar de ser uma opção validada pela literatura, limita bastante as opções de análise e configuração do processo. A ausência das relações cinéticas entre a biomassa microbiana e o substrato, tornam sem efeito configurações de planta com reciclo de biomassa, o que como visto aumentaria a produção de biogás. Além disso, a ausência de influência de outros parâmetros no modelo que não a quantidade de substrato na corrente de entrada, torna a análise de fatores que na prática são essenciais à produção de biogás, como TRH e temperatura, inúteis, já que o biogás gerado acaba não sofrendo nenhuma alteração na sua composição, independentemente das variações sofridas em ambos.

Quanto ao simulador em si, também foram encontradas alguns problemas e limitações. Para a separação do estado líquido-vapor dos componentes, o programa tem como método o uso padrão do ponto de ebulição. Como a operação se dá a 37°C, toda água sai no digestato como líquido, enquanto toda amônia sai como gás no biogás. Entretanto, é sabido que não é assim que ocorre na realidade, uma vez que o biogás sai saturado de água enquanto o percentual de NH<sub>3</sub> é mínimo uma vez que esta é altamente solúvel, saindo praticamente toda no digestato. Como não se encontrou uma maneira de fazer esta divisão líquido-vapor dos dois componentes sem desregular toda a planta, considerando que as concentrações de ambos no biogás costuma ser abaixo de 5% (no caso da amônia geralmente são vestígios), optou-se por alterar o método somente da amônia de ponto de ebulição para opção “líquido/sólido puro”. Assim, toda a amônia foi considerada em seu estado dissolvido, saindo no digestato, enquanto o biogás ficou composto apenas por CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S. É importante também ressaltar que mesmo com a ausência destas substâncias no biogás, este ainda sim passa pelo tratamento de secagem, de modo a tentar simular um planta mais próxima da realidade possível.

Outra limitação encontrada no simulador foi a relação ao biofiltro percolador. Apesar do SPD possuir uma unidade de operação própria para a biofiltração, chamada de “*trickling filtration*”, o programa não considera o tratamento de correntes gasosas por filtro biológico,

somente líquida, acusando erro em caso de tentativa. Para contornar este problema, criou-se uma “*generic box*” opção fornecida pelo programa justamente para suprir a eventual ausência de alguma unidade de operação no seu banco de dados. A “*generic box*” foi criada com a opção reação e separação, uma vez que ocorrem reações dentro do biofiltro, e o biogás e o H<sub>2</sub>S são separados em correntes distintas. Ainda, adicionou-se um misturador antes para representar a injeção de ar na operação, uma vez que as bactérias necessitam do oxigênio presente no ar para oxidar o H<sub>2</sub>S.

Apesar de tudo, pode-se ver nas Tabelas 6 e 7 abaixo que o biogás bruto, ou seja, logo após sua saída do digestor, apresentou concentrações dentro dos valores encontrados na literatura, com cerca de 62,1% de CH<sub>4</sub>, 37,8% de CO<sub>2</sub> e 0,1% de H<sub>2</sub>S em base volumétrica. Destaca-se também que com a alteração do NH<sub>3</sub> para sua forma líquida na corrente do digestato, pôde-se perceber que o nível de nitrogênio amoniacal se encontra abaixo de 1,7g/L limite de concentração no qual os sistemas podem começar a apresentar alguma inibição por amônia.

**Tabela 5:** Composição de saída do biogás bruto

Componente	Vazão (kg/h)	% Componente (Massa)	Concentração (mol/L)
CO <sub>2</sub>	5,80203	62,5149	0,016345
H <sub>2</sub> S	0,00196	0,0211	0,000007
CH <sub>4</sub>	3,47705	37,464	0,02687

Fonte: *SuperPro Designer*®

**Tabela 6:** Composição de saída do digestato bruto

Componente	Vazão (kg/h)	% Componente (Massa)	Concentração (g/L)
Amônia	0,08292	0,1641	1,630117
Biomassa	1,39536	2,761	27,431265
Inertes	0,28	0,554	5,504489
Água	48,78033	96,5209	958,967052

Fonte: *SuperPro Designer*®

#### 5.4 ANÁLISE ECONÔMICA PRELIMINAR

Uma das grandes funcionalidades do *SuperPro Designer*® é sua ferramenta de avaliação econômica, que permite ao usuário analisar a viabilidade de um projeto por meio de relatórios detalhados contendo estimativas da receita gerada e custos envolvidos na implantação e operação do processo.

Como o objetivo do trabalho não consiste na geração de receita com a venda de um produto, optou-se por dividir esta análise em duas partes, análise de custo, onde são

apresentados os resultados obtidos pelo programa na implantação e operação da planta, e análise de benefícios e aplicações , onde discute-se os potenciais usos para o biogás produzido e seus impactos.

#### 5.4.1 Análise de custos

Embora a ausência de um produto a ser comercializado e, portanto, de uma receita, inviabilize uma análise direta de viabilidade econômica da planta, foi feita uma tentativa de análise de indireta comparando-se os resultados obtidos com o SPD com os apresentados por Moura (2017) em seu estudo.

**Tabela 7:** Valores encontrados por Moura (2017) e o presente trabalho para uma planta de biogás a partir de resíduos alimentares do RU Central

Item	MOURA (2017)	ESTE TRABALHO
Massa de resíduos alimentares	780 Kg/dia	786 Kg/dia
Investimento inicial	71.946,56 \$*	9.501.000,00 \$
Custo operacional	6.338,74 \$*/ano	3.828.000,00\$/ano
Volume de biogás produzido	2.332,20 m <sup>3</sup> /mês	6.140,16 m <sup>3</sup> /mês

\* Dólar cotado a R\$ 3,144 (GLOBO, 2017)

**Fonte:** Moura (2017); elaboração própria a partir do relatório de avaliação econômica do *SuperPro Designer*®

Em que pese o uso de uma metodologia e abordagem diferentes, os resultados obtidos pelo SPD mostraram-se bastante discrepantes, chegando a valores 132 vezes maiores para o capital de investimento e 603 vezes para o custo operacional anual. Acredita-se que tamanha disparidade só possa ser explicada pela falta de dados mais específicos, o que forçou o presente trabalho a adotar valores e modelos gerais recomendados pelo programa.

Analisando ambos os parâmetros, cerca de 93% do capital de investimento estimado pelo SPD (Tabela 9) é composto pelo capital fixo, que por sua vez utiliza como principal critério de estimativa o preço total de aquisição dos equipamentos (Figura 33). Como é muito difícil obter este tipo de dado na literatura, a opção tomada foi utilizar o *Built in Cost model*, ferramenta padrão do programa que calcula automaticamente o preço dos equipamentos caso não seja inserido nenhum valor individual para os mesmos.

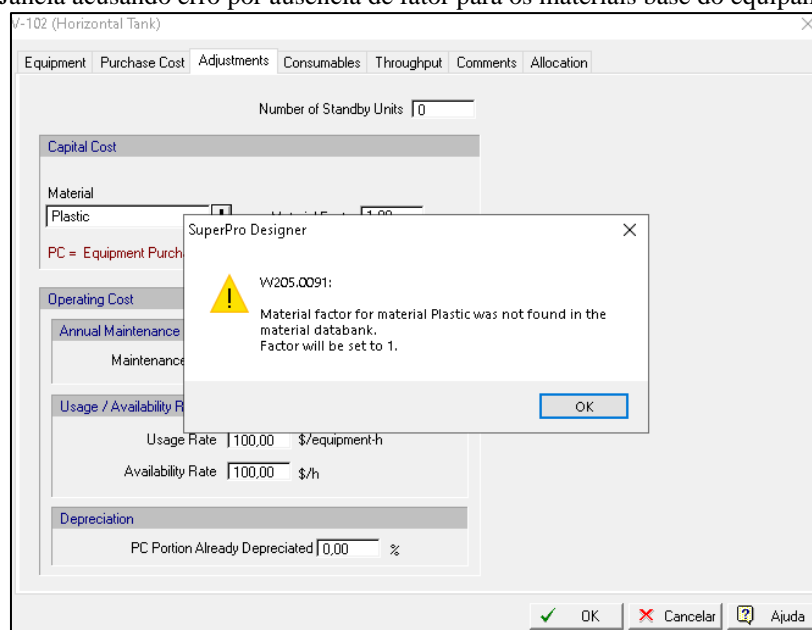
**Tabela 8:** Investimento inicial para realização do projeto

ITEM	VALOR
Capital fixo estimado	\$ 8.862.000,00
Capital de giro estimado	\$ 195.855,00
Start up da planta e validação de custos	\$ 443.092,00
<b>Total</b>	<b>\$ 9.501.000,00</b>

**Fonte:** Elaboração própria a partir do relatório de avaliação econômica do *SuperPro Designer*®

A escolha por deixar o SPD calcular o preço dos equipamentos, porém, gerou alguns problemas. O primeiro deles foi que, embora o SPD permita alguns ajustes, com a escolha de alguns poucos materiais na construção de cada equipamento, o programa não possui o fator de cálculos de nenhum deles em seu banco de dados, acusando sempre o uso do mesmo valor para todos os materiais. Desta forma, materiais relativamente baratos como o plástico, que poderia ser usado para o cálculo do preço do gasômetro, por exemplo, acabam tendo na prática o mesmo valor que materiais muito mais caros como o titânio, havendo um superfaturamento dos equipamentos. A Figura 31 apresenta o aviso emitido pelo programa toda vez que se tenta selecionar um material diferente.

**Figura 30:** Janela acusando erro por ausência de fator para os materiais base do equipamento

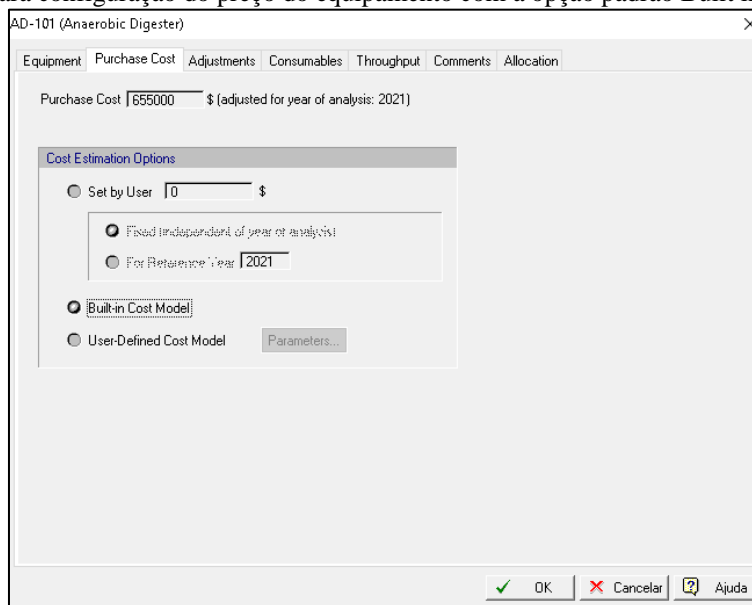


**Fonte:** *SuperPro Designer*®

Outra questão encontrada foi a falta de acesso ao usuário, aos dados e cálculos utilizados pelo modelo *Built in*, tornando-se impossível contestar os resultados obtidos, mesmo sendo

observadas algumas anormalidades, como a pequena diferença de preço entre o tanque de alimentação e o digestor, embora o último seja cerca de 621 maior que o primeiro além de teoricamente mais tecnológico (Tabela 10). A Figura 32 mostra a janela para configuração do preço do equipamento utilizando a opção “*Built in cost model*”.

**Figura 31:** Janela para configuração do preço do equipamento com a opção padrão *Built in cost model*.



Fonte: *SuperPro Designer*®

**Tabela 9:** Relação de equipamentos utilizados na planta e preço de aquisição calculado pelo *Built in model*

Quantidade	Descrição	Custo Unitário	Custo Total
1	Digestor Anaeróbio. Volume do tanque = 45,5 m <sup>3</sup>	\$ 655.000,00	\$ 655.000,00
1	Triturador Capacidade = 32,75 kg/h	\$ 98.000,00	\$ 98.000,00
1	Tanque de Alimentação/ Mistura Volume = 66,83 L	\$ 197.000,00	\$ 197.000,00
2	Bomba centrífuga	\$ 12.000,00	\$ 24.000,00
1	Compressor centrífugo	\$ 98.000,00	\$ 98.000,00
1	Trocador de calor	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
1	Válvula gaveta	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00
1	Gasômetro Volume = 5,65 m <sup>3</sup>	\$ 58.000,00	\$ 58.000,00
1	Tanque de armazenamento do digestato. Volume = 9,45 m <sup>3</sup>	\$ 92.000,00	\$ 92.000,00

Fonte: Elaboração própria a partir do relatório de avaliação econômica do *SuperPro Designer*®

Como abordado, todo o capital direto fixo tem como base de cálculo o preço total de aquisição dos equipamentos ou *purchase cost*, desta forma não só os equipamentos mas também os custos diretos e indiretos envolvidos na implantação do processo, como gastos com tubulações, engenharia, construções, instalação elétrica, tudo, se torna extremamente dependente do modelo do SPD, fazendo com que qualquer desvio de estimativa tenha um impacto muito maior nos custos totais.

**Figura 32:** Janela de configuração do capital direto, exibindo os diversos parâmetros utilizados e sua relação direta com o preço dos equipamentos

Section: 'Main Section' (Capital Investment)

DFC Cost Alloc Misc

Direct Fixed Capital (DFC) 8861.83 thous. \$

**DFC Estimation Options**

Set by User

Estimated Based on Total Equipment Purchase Cost (PC)

PC = Listed Equipment Purchase Cost + Unlisted Equipment Purchase Cost

Unlisted Equipment Purchase Cost 0.20 x PC

**PC Factor Options**

Using a Composite PC Factor: DFC = 4.00 x PC

Using a Distributed Set of PC-Factors

Direct Fixed Capital (DFC) = Direct Cost (DC) + Indirect Cost (IC) + Other Cost (OC)

**Direct Cost (DC)** Use Site Data

Piping (A) 0.35 x PC

Instrumentation (B) 0.40 x PC

Insulation (C) 0.03 x PC

Electrical Facilities (D) 0.10 x PC

Buildings (E) 0.45 x PC

Yard Improvement (F) 0.15 x PC

Auxiliary Facilities (G) 0.40 x PC

Installation = Installation of Listed Equip. + Installation of Unlisted Equip.

Unlisted Equip. Installation Cost 0.50 x Unlisted Equip. PC

DC = PC + Installation + A+B+C+D+E+F+G

**Indirect Cost (IC)** Use Site Data

Engineering (H) 0.25 x DC

Construction (I) 0.35 x DC

**Other Cost (OC)** Use Site Data

Contractor's Fee 0.05 x (DC + IC)

Contingency 0.10 x (DC + IC)

OK Cancelar Ajuda

Fonte: SuperPro Designer®

Em relação aos custos operacionais (Tabela 11), os maiores gastos ficam por conta da manutenção da planta e o custo com mão de obra trabalhadora, que respondem juntos por 99,9% do total. Ressalta-se ainda que o custo com o material não foi computado devido a uma limitação do programa, que não permite fazer distinção entre a água de diluição e água presente no substrato, tornando inviável a sua precificação, uma vez que o substrato por ser um resíduo gerado no local deve possuir custo zero.

**Tabela 10:** Custo anual total de operação

Item	Custo	%
Material	\$ -	0
Mão de obra	\$ 2.151.000,00	56,2
Manutenção	\$ 1.674.000,00	43,7
Utilidades	\$ 3.000,00	0,09
<b>Total</b>	<b>\$ 3.828.000,00</b>	<b>100</b>

**Fonte:** Elaboração própria a partir do relatório de avaliação econômica do *SuperPro Designer*®

Para o cálculo dos custos operacionais, novamente, devido à ausência de dados específicos na literatura e falta de experiência prática do autor, foram utilizados os valores recomendados pelo SPD que podem ser conferidos na tabela 12:

**Tabela 11:** Dados utilizados para a configuração dos parâmetros de custo operacional

Utilidades	Preço Unitário	Unidade	Referência
Energia elétrica	\$ 0,10	kW-h	Banco de dados do SPD
Vapor	\$ 12,00	MT	Banco de dados do SPD
Água a 20°C	\$ 0,05	MT	Banco de dados do SPD
Água a 5°C	\$ 0,40	MT	Banco de dados do SPD
Mão de obra	Preço da hora	Unidade	Referência
Operador	\$ 24,00	hora	Banco de dados do SPD
Supervisor	\$ 100,00	hora	Banco de dados do SPD

**Fonte:** Elaboração própria a partir do relatório de avaliação econômica do *SuperPro Designer*®

Observa-se que em relação aos custos com mão de obra, o parâmetro principal utilizado (o preço unitário da mão de obra) apresenta valores recomendados bastante acima da realidade, uma vez que mesmo um simples operador, receberia cerca R\$ 88.200,00 mensais caso se adotasse a mesma cotação da moeda utilizada para construir a tabela 8.

Quanto aos custos relativos à manutenção da planta, podemos ver pela Figura 34 que seu cálculo tem como base os valores indicados nos equipamentos, sendo influenciados diretamente pelos resultados obtidos através do modelo de precificação *Built in* e, portanto, carregando os mesmos problemas já apontados.



**Figura 33:** Parâmetros utilizados para o cálculo de custo de manutenção

The screenshot shows the 'Section Main Section (Operating Cost Adjustments)' dialog box with the following settings:

- Based on Operating Parameters:**
  - Based on Equipment-Usage/Availability Rate**  
Facility-Dependent Cost =  $\text{SUM}\{(\text{Equipment Rate}) \times (\text{Equipment Hours})\}$   
Equipment Hours Calculation:  Usage Basis  Availability Basis
  - Based on Facility Availability Rate** (Use Site Data   
Facility-Dependent Cost =  $(\text{Facility Availability Rate}) \times (\text{Hours of Availability})$   
Facility Availability Rate: 500,00 \$/facility-h
- Based on Capital Investment Parameters:**  
Facility-Dependent Cost =  $(\text{Depreciation}) + (\text{Maintenance}) + (\text{Miscellaneous})$ 
  - Include Maintenance**
    - Use Equipment Specific Multipliers
    - Estimate as: 6,00 % DFC (Direct Fixed Capital)
  - Include Depreciation**
    - Use Contribution From Each Equipment's Undepreciated Purchase Cost
    - Use Section DFC (Portion Already Depreciated: 0,00 %)
  - Include Misc Costs** (Use Site Data 
    - Insurance: 1,00 % DFC
    - Local Taxes: 2,00 % DFC
    - Factory Expense: 5,00 % DFC

Fonte: Elaborado a partir do relatório de avaliação econômica do *SuperPro Designer*®

#### 5.4.2 Análise de benefícios e aplicações

A forma de aproveitamento energético do biogás depende da qualidade da sua composição, uma vez que a presença de água, H<sub>2</sub>S e NH<sub>3</sub> a partir de determinadas concentrações limitam o seu uso em diversos equipamentos.

Para a presente simulação, considerando que tanto a umidade quanto a presença de NH<sub>3</sub> no gás não puderam ser computadas devido às limitações encontradas no programa, o único critério avaliado foi a concentração de H<sub>2</sub>S, sendo os resultados obtidos divulgados na figura 35:

**Figura 34:** Composição final do biogás pronto para uso

Stream Biogás para uso (P-10 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env. Properties Comments

Stream Contents  Total  Liquid/Solid  Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (mg/L)	Extra-Cell (%)
1	Carb. Dioxide	5,80203	62,5278	680,365602	100,00
2	Hydr. Sulfide	0,00004	0,0004	0,004586	100,00
3	Methane	3,47705	37,4718	407,730861	100,00

Total Flowrates

Mass Flow | 9,279 | kg/h

Volumetric Flow | 8527,817 | L/h

Temperature | 25,00 | °C

Pressure | 1,013 | bar

Enthalpy | 0,192 | kW-h/h

Activity | 0,00 | U/mL

Units Mass | kg | Vol. | L | Composition | % | Conc. | mg/L | Enthalpy | kW-h |

Time Reference for Flows  Batch  Source Cycle  Destination Cycle  Time Average | h |

OK Cancelar Ajuda

Fonte: SuperPro Designer®

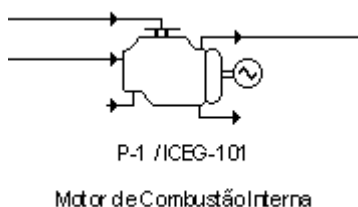
Como pode-se observar, a concentração de H<sub>2</sub>S foi de 0,004583 mg/L ou 4,586 mg/m<sup>3</sup>, valor bem abaixo dos limites retratados no Quadro 4, o que permitiria o aproveitamento direto do biogás pelo RU Central para cocção de alimentos ou mesmo para geração de energia elétrica por meio de motores ou turbinas.

No caso do seu aproveitamento para cocção, o biogás poderia ser queimado diretamente em fogões exclusivos ou convencionais, desde que para o último houvesse uma adaptação, tendo vista que o biogás possui pressão menor que o GLP e o gás natural tradicionalmente utilizados. A taxa de consumo de biogás para um queimador é de 0,45 m<sup>3</sup>/h (NIDECO, 2021) e a taxa de produção de biogás obtida pelo SPD foi de 8527,817 L/h (Figura 33) o que equivale 8,5 m<sup>3</sup>/h. Dessa forma, o biogás fornecido pela planta seria capaz de manter até 18 bocas abastecidas ininterruptamente todos os dias, gerando uma enorme economia no consumo de gás utilizado pelo RU Central. De fato, se for considerado que 1 m<sup>3</sup> de gás natural corresponde a 1,27 kg de GLP (CEGAS, 2021) e que 1m<sup>3</sup> de biogás equivale a 0,45 kg de GLP, a redução

mensal de gás natural seria de aproximadamente 3.500 m<sup>3</sup>, cerca de 43% do consumo médio mensal do RU em 2016 (MOURA, 2017), o que geraria uma economia anual de R\$ 213.527,00 para a Universidade levando em conta a tarifa atual de R\$ 5,55 praticada pela Naturgy nestes casos (NATURGY, 2021).

Já para os casos de geração de energia elétrica a quantidade de energia disponível dependeria do tipo de sistema de geração utilizado e do consumo de energia da própria planta. Para calcular a energia total gerada utilizou-se uma versão de testes mais avançada do SPD uma vez que a versão utilizada para o trabalho não possuía motores de combustão interna, considerado o mais indicado para este porte de planta. Os parâmetros de entrada do biogás no motor foram os mesmos divulgados na figura 35 e a eficiência elétrica foi configurada como mínima, na faixa de 34%, o que resultou na geração anual de 124.656,3 kW-h. Como o consumo calculado pela planta foi de 31.433,25 kW-h, isto significa que anualmente haveriam 93.223,05 kW-h disponíveis para serem utilizados pelo RU Central em equipamentos e iluminação. A título de comparação, a média residencial de consumo de energia elétrica em 2019 foi de 162 kW-h/ mês, ou seja, a quantidade de energia disponível gerada pela planta seria o suficiente para suprir 47 residências todo mês ao longo de 2019 (EPE, 2020). A figura 36 mostra o símbolo do motor nas versões mais atuais do *SuperPro Designer*®

**Figura 35:** Motor de combustão interna sem cogeração de energia



**Fonte:** *SuperPro Designer*® versão 11

Ressalta-se ainda outros benefícios que vão além do aproveitamento energético e suas aplicações.

Do ponto de vista ambiental, por exemplo, o tratamento diário de 786 kg de resíduos alimentares, significaria uma redução de 259,38 toneladas de resíduos encaminhadas ao aterro sanitário todos os anos, aumentando a sua expectativa de vida, diminuindo a probabilidade de impactos negativos gerados pelo aterramento da matéria orgânica, além de proporcionar à universidade uma economia nos custos com transporte e destinação destes resíduos, na ordem de R\$ 15.562, considerando uma tarifa de R\$ 60/tonelada. MOURA (2017).

Outro aspecto ambiental muito importante seria em relação ao sequestro dos gases de efeito estufa. De acordo com a figura 33, a planta geraria 3,47 kg/h de CH<sub>4</sub>, o que daria uma quantia anual de 27, 482 toneladas que seriam transformados em CO<sub>2</sub>, durante a sua combustão para geração de energia térmica ou elétrica, havendo ainda a possibilidade de receitas com a venda de créditos de carbono.

Finalmente, o aspecto educacional também deve ser considerado. Uma planta de pequeno porte dentro da universidade seria uma grande oportunidade de aprendizado prático para alunos de diversas áreas da Engenharia, Química e afins. O projeto também poderia suscitar diversos estudos visando a sua melhoria, aumentando a produção acadêmica, além do conhecimento agregado com a experiência poder ser transformando em receita para o próprio RU através de aulas e cursos para o público externo

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo conceber uma planta de biogás para o aproveitamento energético dos resíduos alimentares gerados no RU Central da UFRJ, de modo a propor uma alternativa mais sustentável tanto ambientalmente quanto economicamente à prática usual de disposição em aterros. Embora o modelo de biodigestão utilizado não tenha sido o mais completo, os resultados evidenciaram um enorme potencial de geração de energia a partir do biogás, que poderia ser usado na manutenção das atividades do restaurante, gerando economia nos custos com gás natural e/ou eletricidade, além das despesas relacionadas à sua destinação e tratamento nos aterros.

Ressalta-se também a importância do uso de simuladores de processo na concepção de projetos de engenharia. O *SuperPro Designer*®, permitiu na maioria das vezes uma fácil identificação e configuração dos equipamentos e seus parâmetros, tornando um processo intrinsecamente complexo como a digestão anaeróbia em uma tarefa mais intuitiva e menos complicada. Foi possível enxergar as condições de cada corrente, bem como as variações de massa e volume esperadas, além de diversas informações estratégicas graças aos diversos recursos para análise que o programa dispõe.

Cabe salientar no entanto, que o uso do recurso de análise econômica do projeto fornecido pelo *SuperPro Designer*®, apesar de ser um diferencial positivo, deve ser analisado com cautela, uma vez que a adoção dos valores sugeridos não coincide com a realidade brasileira, demandando, portanto, um grande número de informações específicas para obtenção de resultados mais acurados.

Por fim, destaca-se ainda que a experiência e o aprendizado proporcionados pela utilização de uma ferramenta de simulação de processos trouxe grande enriquecimento profissional, e que o presente trabalho cumpre o seu objetivo maior, ao contribuir não só como uma base para estudos futuros, uma vez que ainda não se encontram na literatura brasileira trabalhos desenvolvidos com o *SuperPro Designer*® sobre este tema, mas também como uma fonte de informação e difusão de conhecimento sobre possíveis soluções sustentáveis para um dos maiores desafios atuais da humanidade.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Tendo em vista os objetivos iniciais assumidos e os resultados alcançados, pode-se concluir que:

- ❖ A revisão da literatura permitiu a obtenção de todos os parâmetros necessários para o desenvolvimento de uma planta de biogás visando o seu aproveitamento energético;
- ❖ O simulador *SuperPro Designer*® trouxe grande facilidade à consecução do objetivo geral do trabalho, possibilitando a esquematização de toda a planta incluindo seus equipamentos e operações além de um maior entendimento dos fluxos do processo;
- ❖ A análise preliminar de custo apontou um valor considerável na implantação e operação do projeto, havendo, porém, uma boa margem para redução dos gastos calculados;
- ❖ Os resíduos alimentares do RU Central apresentam um grande potencial para geração de biogás diário com uma boa qualidade de metano;
- ❖ O projeto possui potencial de retorno, podendo gerar economia nos gastos da Universidade além de benefícios ambientais, educacionais e científicos.

Além disso, considerando as limitações apresentadas durante o estudo e pensando em trabalhos futuros, sugere-se:

- ❖ Desenvolvimento de experimento em escala de bancada para um levantamento mais completo de dados, além de um estudo mais aprofundado sobre o modelo de digestão anaeróbica ADM1, permitindo a adoção de um modelo mais completo que permita a simulação das relações cinéticas envolvidas no processo;
- ❖ Levantamento dos preços dos equipamentos diretamente com os fabricantes, permitindo um cálculo dos custos mais acurado e próximo a realidade;
- ❖ Tipificação e levantamento da quantidade e preço da mão de obra necessária para gerenciamento da planta, permitindo um cálculo dos custos mais próximo a realidade praticada no país;
- ❖ Inclusão da etapa de tratamento do digestato, verificando seu potencial para geração de receita e abatimento dos custos relacionados a planta de biogás;
- ❖ Aprofundamento das metodologias de cálculo de emissão de gases de efeito estufa e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo, verificando o seu

potencial para geração de receita com créditos de carbono e abatimento dos custos relacionados a planta de biogás.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S.A. **Biogas Energy**. Springer, 2012
- ABRELPE. **Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2015.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020.
- AKUNNA, J. C. **Anaerobic waste-wastewater treatment and biogas plants : a practical handbook**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018
- ALVES, I. R. F. S. **Avaliação da Codigestão na Produção de Biogás**. 2016. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- ALVES, V. M. C. **Análise de Produção de Inovação Tecnológica do Biogás no Brasil de 2006 a 2016**. 2016. 62 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Bioprocessos) - Universidade Federal de São João Del-Rei, Ouro Branco, Minas Gerais, 2016.
- ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AHRING B.K. A Mathematical Model for Dynamic Simulation of Anaerobic Digestion of Complex Substrates: Focusing on Ammonia Inhibition. **Biotechnology and bioengineering**. v.42, p. 159 – 166, 1993.
- ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AHRING B.K. A Comprehensive Model of Anaerobic Bioconversion of Complex Substrates to Biogas. **Biotechnology and bioengineering**. v.63, n.03, p. 363 – 372, 1999.
- ANP. **Resolução nº 685 de 23 de junho de 2017**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 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=BIOMETANO>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2021.
- ARAÚJO, D. M. O mecanismo de desenvolvimento limpo e os benefícios para o Estado do Amapá. **Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas**. Macapá, n. 4, p. 87-97, 2012.
- AWE, O.W *et al.* A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. **Waste Biomass Valor**. v. 8, p. 267–283, 2017.
- BALTRÉNAS, P.; BALTRÉNAITĖ, B. **Small Bioreactors for Management of Biodegradable Waste**. Springer International Publishing AG, 2018
- BANKS, C. J. *et al.* **Food waste digestion: Anaerobic Digestion of Food Waste for a Circular Economy**. MURPHY, J.D. (Ed.) IEA Bioenergy Task 37, 2018.



BHARATHIRAJA, B. *et al.*, Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.90, p. 570 – 582, 2018

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Legislação republicana brasileira, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Saneamento Básico**: Caderno Temático de valorização dos resíduos orgânicos. Brasília, 2019.

CASSINI, S. T. ; COELHO, S. T. ; PECORA, V. Biogás- Biocombustíveis ANP. *In*: PERLINGEIRO, C. A. G. (ed.). **Biocombustíveis no Brasil**: Fundamentos, Aplicações e Perspectivas. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia: Acta, 2014. p. 136 – 167.

CECCHI, F. *et al.* Characteristics of the OFMSW and behaviour of the anaerobic digestion process. *In*: MATA-ALVAREZ (ed.). **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Londres: IWA Publishing, 2003. p. 141 – 179.

CEGAS. Equivalência energética, 2021. Disponível em: <https://www.cegas.com.br/gas-natural/equivalencia-energetica/>. Acesso em 18 de fevereiro de 2021.

CIBIOGAS. **Conceitos básicos e digestão anaeróbia**. Curso de Fundamentos do Biogás. Data completa 2020a.

CIBIOGAS. **Características e Aplicações do Biogás e do Digestato**. Curso de Fundamentos do Biogás. Data completa 2020b.

CIBIOGAS. **Meta 2: Manual para transporte e armazenamento do biogás**. Foz do Iguaçu, 2019

CONNOR, N. **O que é o Ciclo Rankine – Ciclo da Turbina a Vapor – Definição**. Thermal engineering.org, 26 de janeiro de 2020. Disponível em: [https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-ciclo-rankine-ciclo-da-turbina-a-vapor-definicao/#:~:text=Em%20geral%2C%20o%20ciclo%20Rankine,vapor\)%20como%20fluido%20de%20trabalho](https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-ciclo-rankine-ciclo-da-turbina-a-vapor-definicao/#:~:text=Em%20geral%2C%20o%20ciclo%20Rankine,vapor)%20como%20fluido%20de%20trabalho). Acesso em: 05/02/2021.

DENG, L. *et al.* **Biogas Technology**. 2020. Singapura: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**: An introduction. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

DROSG, B.; BRAUN, R.; BOCHMANN, G. Analysis and characterisation of biogas feedstocks. *In*: WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. (ed.). **The Biogas Handbook**: Science, production and applications. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. p. 50 – 84

EDELMANN, W. Products, impacts and economy of anaerobic digestion of OFMSW. *In*: MATA-ALVAREZ (ed.). **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Londres: IWA Publishing, 2003. p. 265 – 301.

EPE. Resenha mensal do mercado de energia elétrica, janeiro de 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-510/Resenha%20Mensal%20-%20Janeiro%202020\\_v4.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-510/Resenha%20Mensal%20-%20Janeiro%202020_v4.pdf) . Acesso em 18 de fevereiro de 2021.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Guia técnico ambiental do biogás na agroindústria**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2015.

FERNANDES, F.; DA SILVA, S.M.C.P. **Manual prático da compostagem de biossólidos**. Londrina: PROSAB, 1999.

FERREIRA, B.O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado 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, Minas Gerais, 2015.

FERREIRA, B.O. *et al.* Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro – Brazil. **Renewable Energy**. vol.146, p. 1976 – 1983, 2019.

FOSTER-CARNEIRO, T. *et al.* **Anaerobic Digestion: Pretreatments of Substrates**. In: MUDHOO, A. (ed.). **Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion**. Canadá: Scrivener Publishing LLC, 2012. p. 1 – 20.

GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JUNIOR, A. D. N. Part. I Biogás. In: COELHO, S.T. (coord.). **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: Synergia, 2018. p. 1 - 82

GLOBAL METHANE INITIATIVE. Global methane emissions, 2020. Disponível em <https://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf> Acesso em 20 Dezembro 2020.

GLOBO. G1 Economia, 2017. Disponível em <https://g1.globo.com/economia/noticia/cotacao-do-dolar-281217.ghtml>. Acesso em 15 de fevereiro de 2021.

GONÇALVES, T. A. C. **Avaliação do potencial energético a partir de dejetos animais**. 2017. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biocombustíveis e Petroquímica) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

GRANDO, R. L. **Mapeamento tecnológico da cadeia produtiva do biogás**. 2017. 227 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

GEBRESLASE, G. A.; GEBRIHET, F. G; ATSBHA, M. M. Process Simulation and Design of Biogas Plant using Food Waste as Feedstock. **International Journal of Innovative Science and Research Technology**. v. 03, p. 573 – 599, 2018.

HARUN, N. *et al.* Anaerobic Digestion Process of Food Waste for Biogas Production: A Simulation Approach. **Chemical Engineering Technology**. Weinheim. v. 42, n.9, p. 1834 – 1839, 2019.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/default.shtm>. Acesso em 15 de dezembro de 2020.

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

IEA.Methane Tracker 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020> Acesso em 20 de Dezembro 2020.

INTELLIGEN. SuperPro Designer Overview. Disponível em: <https://www.intelligen.com/products/superpro-overview/>. Acesso em 15 de fevereiro de 2021.

IPCC, 2014: **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.

IPCC. Waste generation, Composition and Management data. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019.

KAZA, S. *et al.* **What a Waste2.0**. World Bank Publications, 2018.

KERROUM, D.; MOSSAB, B.; HASSEN, M. A. Production of Biogas from Sludge Waste and Organic Fraction of Municipal Solid Waste. *In*: KUMAR, S. (ed.). **Biogas**. Rijeka: InTech, 2012. p. 151 - 172

KUNZ, A. *et al.* **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1. ed. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LANDIM, A.L.P.F; AZEVEDO, L.P. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável**. BNDES, 2006.

LIMA, A. C. G; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES**. 2012. 106 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 2012.

MARIANI, L. **Biogas : diagnóstico e proposta para incentivar o seu uso no Brasil**. 2018. 124 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2018.

MARTINS, A. S. **Digestão anaeróbia de resíduos alimentares**: efeito da carga orgânica e da adição de elementos traço sobre a produção de metano e a diversidade microbiana. 2018. 156 f. 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, Minas Gerais, 2018.

MATA-ALVAREZ, J. Fundamentals of the anaerobic digestion process. *In*: MATA-ALVAREZ (ed.). **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Londres: IWA Publishing, 2003. p. 1 – 18.

MOURA, R. P. **Avaliação do potencial de geração de energia a partir dos resíduos orgânicos do restaurante universitário central da UFRJ**. 2017. 73 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MUÑOZ, Raúl *et al.* A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Reviews In Environmental Science And Bio/technology**. v. 14, n. 4, p.727-759, 2015.

NATURGY. Ceg – estrutura tarifária, 2021. Disponível em: [https://www.naturgy.com.br/servlet/ficheros/1297164474792/TabelaCEG\(Site\)01-02-21.pdf](https://www.naturgy.com.br/servlet/ficheros/1297164474792/TabelaCEG(Site)01-02-21.pdf). Acesso em 18 de fevereiro de 2021.

NIDECO. Biogas stove (double or single), 2021. Disponível em: <https://nideco.no/products/biogas%20plants/biogas%20stove>. Acesso em 18 de fevereiro de 2021.

NSAIR, A. *et al.* Operational Parameters of Biogas Plants: A Review and Evaluation Study. **Energies**.v.13, p. 1 – 27, 2020.

PROBIOGAS. **Guia Prático do Biogás**. 5. ed. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010

PROBIOGAS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil**: substratos, digestores e uso de biogás. 1. ed. Ministério das Cidades, Brasília, 2015a

PROBIOGAS. **O estado da arte da tecnologia de metanização seca**. 1. ed. Ministério das Cidades, Brasília, 2015b

RAJARAM, V.; SIDDIQUI, F.Z.; KHAN, M.E. **From landfill gas to energy**: Technologies and challenges. CRC Press, 2011.

RAMOS, R. A. V; SILVA, J. B. C. **Máquinas hidráulicas e térmicas**, 2009. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Mecânica. Disponível em: <http://www.dem.feis.unesp.br/intranet/> . Acesso em 05/02/2021

RODERO, M. R *et al.* Biogas Purification and Upgrading Technologies. *In*: TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H. (ed.). **Biogas: Fundamentals, Process and Operation**. Springer International Publishing AG, 2018. p. 239 – 269.

SANTOS, M. M.; JOPPERT, C. L. Parte II: Biometano. *In*: COELHO, S.T. (coord.). **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: Synergia, 2018. p. 85 – 196

SMANIOTTO, B. **Estudo de viabilidade técnica e econômica de uma planta de biogás para produção de biometano veicular**: estudo de caso – unidade de demonstração itaipu.2020. 78 f. Monografia (Bacharelado em engenharia mecânica) – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas, Foz do Iguaçu, Paraná, 2020.

SHAHRIARI, H. *et al.* Effect of leachate recirculation on mesophilic anaerobic digestion of food waste. **Waste Management**. v.32, 400 – 403, 2012.

TABATABAEI, M. *et al.* Prominent Parameters in Biogas Production Systems. *In:* TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H. (ed.). **Biogas: Fundamentals, Process and Operation**. Springer International Publishing AG, 2018. p. 135 – 161.

TALIA, L. Biogas Plants: Design and Fabrication. *In:* TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H. (ed.). **Biogas: Fundamentals, Process and Operation**. Springer International Publishing AG, 2018. p. 51 – 93

UFRJ. **Cartilha RU em ação**. 2º volume, Rio de Janeiro: UFRJ, 2018. Disponível em: <https://ru.ufrj.br/images/cartilha/Cartilha.pdf>. Acesso em: janeiro de 2021

UN Department of Economics and Social Affairs. (2019). World Population Prospects - Population Division - United Nations. The International Journal of Logistics Management. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/DataQuery/> Acesso em: 19/02/2021.

VAN, D. P. *et al.* A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. **Environmental Engineering Research**. v. 25, n. 1, p. 1 – 17, 2020.

VANDEVIVERE, P; DE BAERE, L; VERSTRAETE, W. Types of anaerobic digester for solid wastes. *In:* MATA-ALVAREZ (ed.). **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. Londres: IWA Publishing, 2003. p. 111 – 140.

VALIJANIAN, E. *et al.* Biogas production systems. *In:* TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H. (ed.). **Biogas: Fundamentals, Process and Operation**. Springer International Publishing AG, 2018. p. 95 – 116

VERGNHANINI FILHO, R. Emissão de óxidos de enxofre (SOX) na combustão industrial. **Revista IPT| Tecnologia e Inovação**. v.4, n.14, 2020.

VG RESÍDUOS. Quais resíduos de alimentos podem ser colocados na composteira? 2019. Disponível em <https://www.vgresiduos.com.br/blog/quais-residuos-de-alimentos-podem-ser-colocados-na-composteira/> . Acesso em 19/02/2021.

WORLD BIOGAS ASSOCIATION. **Global potential of biogas**. 2019

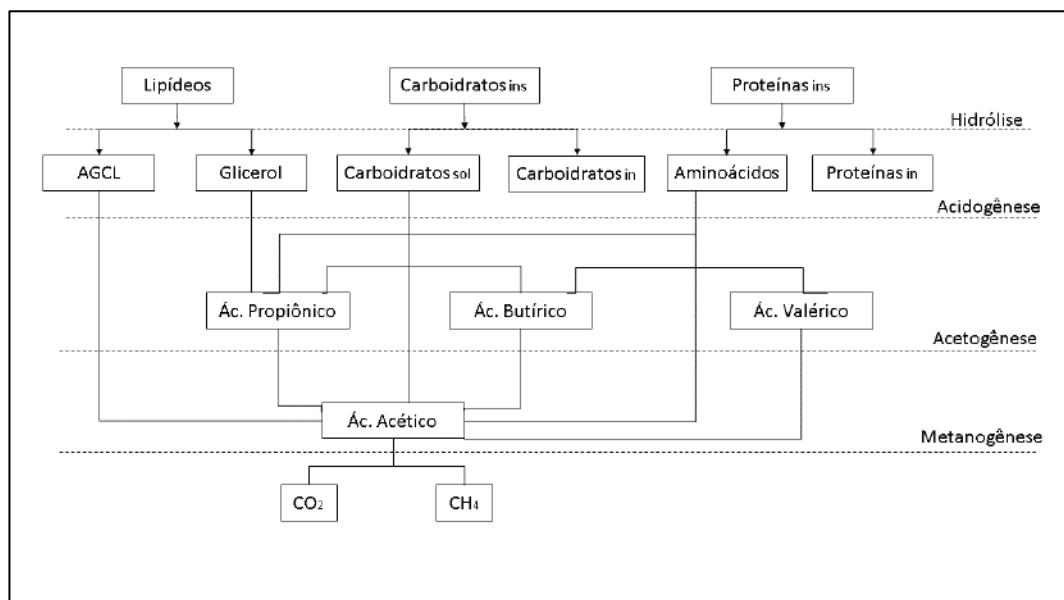
YANAGIHARA, J. I. Máquinas térmicas: Turbinas a gás, [201-]. 20 slides. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3918880/mod\\_folder/content/0/MaqTermicas\\_Turbinas\\_Gas.pdf?forcedownload=1](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3918880/mod_folder/content/0/MaqTermicas_Turbinas_Gas.pdf?forcedownload=1) . Acesso em: 06/02/2021.

YU, L. *et al.* Mathematical Modeling in Anaerobic Digestion (AD). **Bioremediation & Biodegradation**.p.1 – 12, 2013.

ZHANG, C. *et al.* Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.38, p. 383 – 392, 2014.

## APÊNDICE I MODELO DE BIOCONVERSÃO ANAERÓBIA

O modelo de bioconversão anaeróbia foi criado por Angelidaki, Ellegaard e Ahring com o objetivo de descrever o comportamento da degradação anaeróbia da matéria orgânica complexa e codigestão de diferentes tipos de resíduos (ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AHRING, 1999). O modelo inclui duas etapas enzimáticas, hidrólise dos carboidratos e proteínas, e oito etapas bacterianas: degradação acidogênica dos aminoácidos, glicose e glicerol; degradação acetogênicas dos ácidos graxos de cadeia longa (AGCL); degradação acetogênicas dos ácidos graxo voláteis, propiônico, butírico e valérico; e metanogênese acetoclástica, envolvendo cerca de 19 substâncias químicas (YU *et al.*, 2013). A figura abaixo resume as vias reacionais utilizadas pelo modelo.



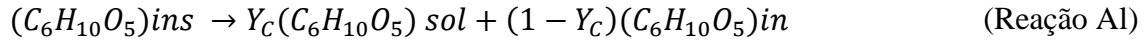
Fonte: Adaptado de ANGELIDAKI *et al.* (1999)

Para alcançar uma precisão razoável que abranja os diversos tipos de resíduos orgânicos, o modelo divide a composição inicial convenientemente em três substâncias gerais: carboidratos, lipídeos e proteínas (YU *et al.*, 2013).

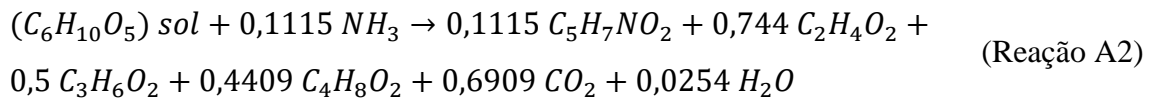
### ❖ Carboidratos:

Na primeira etapa, os carboidratos insolúveis (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>ins</sub> são hidrolisados por exoenzimas em carboidratos solúveis (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>sol</sub> e inertes (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>in</sub> como indicado pela

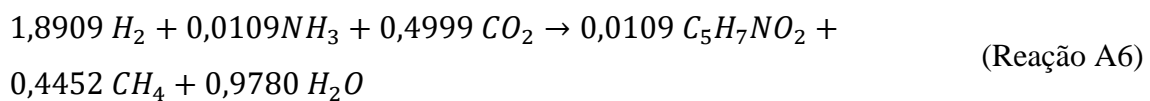
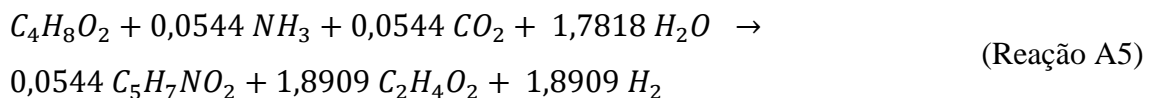
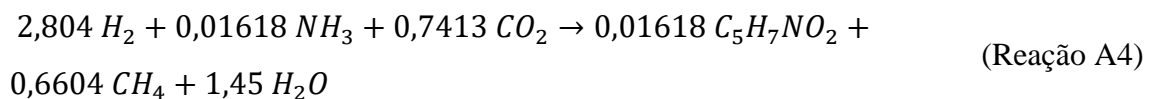
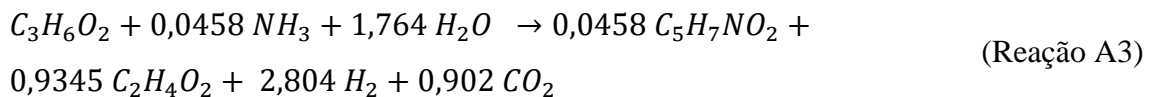
reação (Reação A1), sendo que  $Y_c$  representa a fração de carboidratos considerada degradável (YU *et al.*, 2013).



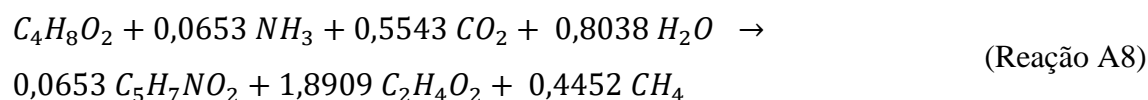
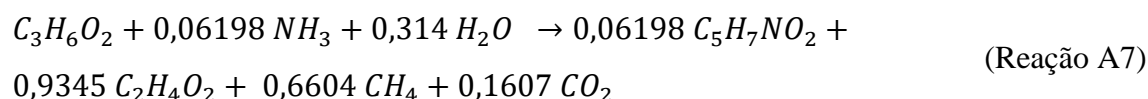
Após a hidrólise, ocorre a acidogênese, onde os carboidratos solúveis são transformados em ácidos graxos voláteis, notadamente ácidos acético ( $C_2H_4O_2$ ), propiônico ( $C_3H_6O_2$ ), e butírico ( $C_4H_8O_2$ ), de acordo com a reação A2. A biomassa gerada é representada pela fórmula empírica ( $C_5H_7NO_2$ ) (YU *et al.*, 2013).



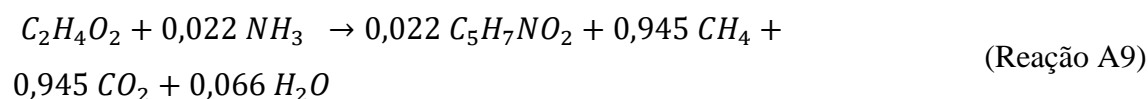
A degradação dos ácidos propiônico e butírico ocorrem em duas etapas. Primeiramente são convertidos na acetogênese à  $C_2H_4O_2$  gerando  $H_2$  que em seguida é assimilado pelas arqueas metanogênicas hidrogenotróficas resultando em  $CH_4$  e  $CO_2$ . As reações A3, A4, A5 e A6 representam estas duas etapas para ambas as substâncias (ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AHRING, 1993).



Estas duas etapas também podem ser representadas como uma só reação geral, como mostrado pelas reações A7 e A8 (ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AHRING, 1993).

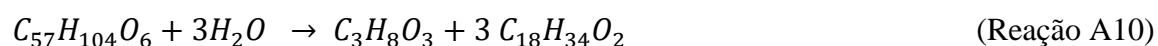


Finalmente, o ácido acético é convertido em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> pelas arqueas metanogênicas acetoclásticas, como pode-se ver na reação A9 (ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AHRING, 1993).

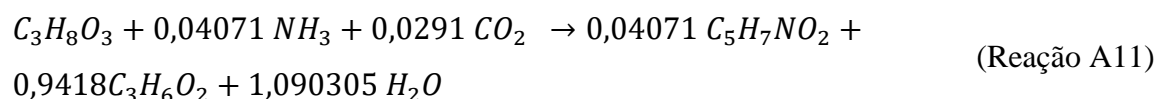


#### ❖ Lipídeos:

Os lipídeos são representados no modelo pelo glicerol trioleato (C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>). A sua hidrólise é mostrada pela reação A10 e tem como produtos o glicerol (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) e oleato (C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>), um dos ácidos graxos de cadeia longa mais encontrado nos resíduos orgânicos e a razão pela escolha do C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub> como lipídeo modelo (YU *et al.*, 2013).

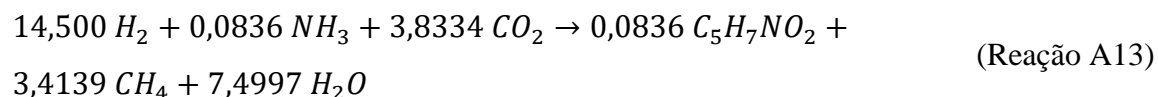
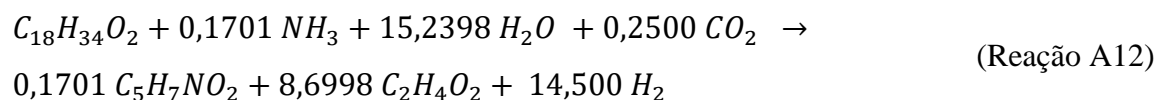


O C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub> é degradado na acidogênese a ácido propiônico pela reação A11 e depois segue o caminho retratado na reação A7.

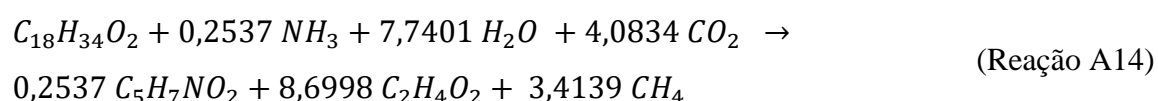


Já a degradação do oleato é realizada em duas etapas, semelhante ao que ocorre com os ácidos propiônico e butírico. Primeiro há acetogênese do oleato que é convertido em ácido acético gerando H<sub>2</sub>. Este H<sub>2</sub> é em seguida assimilado pela arqueas metanogênicas hidrogenotróficas resultando na produção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, como demonstram as reações A12 e A13 (ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AHRING, 1998).



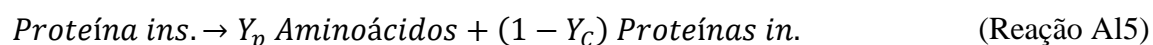


Ambas reações supracitadas também podem ser representadas por uma única reação geral A14.

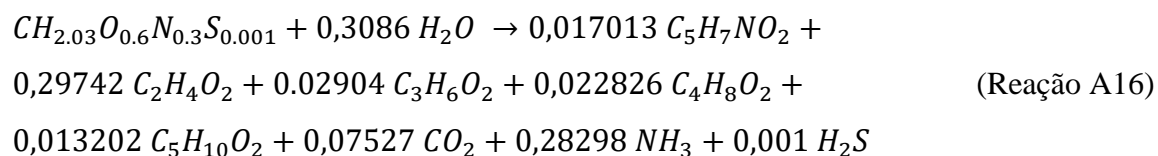


#### ❖ Proteínas:

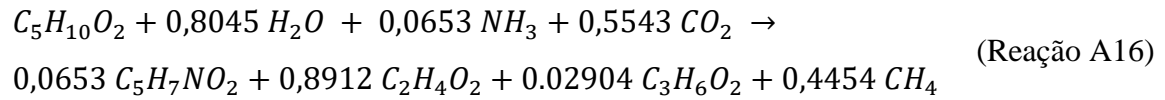
Para representar as proteínas e aminoácidos, o modelo assumiu a fórmula empírica da gelatina ( $CH_{2.03}O_{0.6}N_{0.3}S_{0.001}$ ) uma vez que esta contém uma composição média de aminoácidos que é representativa para muitas proteínas de origem animal. Inicialmente a proteína insolúvel é hidrolisada em aminoácidos e proteínas inertes. A reação é representada por A15 onde  $Y_p$  corresponde a fração de proteínas considerada degradável (YU *et al.*, 2013).



Os aminoácidos, são então degradados pelas bactérias acidogênicas gerando ácidos graxos voláteis,  $CO_2$ ,  $NH_3$  e  $H_2S$  de acordo com a reação A16 (ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AHRING, 1998).



A degradação de  $C_3H_6O_2$ ,  $C_4H_8O_2$  e  $C_2H_4O_2$  seguem respectivamente as reações A7, A8 e A9, já o ácido valérico ( $C_5H_{10}O_2$ ) é convertido em ácido propiônico, acético e  $CH_4$  como demonstrado pela reação A17(ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AHRING, 1998).



Para as reações de hidrólise, o modelo assume taxas de reações de primeira de ordem com inibição por ácidos graxos voláteis enquanto que as reações das etapas de acidogênese, acetogênese e metanogênese seguem Monod em relação ao seu principal substrato (ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AHRING, 1998; YU *et al.*, 2013).

Como a abordagem utilizada no capítulo 4 “METODOLOGIA” foi a estequiométrica, não serão discutidos os assuntos relacionados a cinética do modelo, porém maiores informações podem ser consultadas em Angelidaki; Ellegaard; Ahring (1998).

## APÊNDICE II BALANÇO MATERIAL E DAS CORRENTES

Demanda de material por hora e operação anual

<b>Material</b>	<b>kg/h</b>	<b>kg/ano</b>
Carboidratos	3,78	29,938
Lipídeos	3,31	26,215
Inertes	0,28	2,218
Proteínas	1,6	12,672
Água	50,85	402,732
Ar	0,802	6,351
<b>Total</b>	<b>60,622</b>	<b>480,125</b>

**Fonte:** Elaboração própria a partir do relatório de balanço de material do *SuperPro Designer*®

### Propriedades e composição das correntes

#### Legenda:

INPUT: Corrente de entrada com composição configurada pelo usuário

OUTPUT: Corrente de saída que não alimenta nenhum equipamento.

P-1: Triturador

P-2: Tanque de alimentação /mistura

P-3: Bomba de alimentação do digestor

P-4: Digestor

P-5: Compressor

P-6: Refrigeração

P-7: Válvula de alívio de pressão

P-8: Misturador

P-9: Biofiltro percolador

P-10: Gasômetro

P-11: Bomba de remoção do digestato

P-12: Tanque de armazenamento do digestato

<b>Nome da corrente</b>	<b>Resíduos Alimentares</b>	<b>Substrato pré tratado</b>	<b>Água de diluição</b>	<b>Substrato diluído</b>
<b>Origem</b>	<b>INPUT</b>	<b>P-1</b>	<b>INPUT</b>	<b>P-2</b>
<b>Destino</b>	<b>P-1</b>	<b>P-2</b>	<b>P-2</b>	<b>P-3</b>
<b>Propriedades</b>				
Temperatura (°C)	25	25	25	25
Pressão (atm)	1	1	1	1
Densidade (g/L)	994,48	994,48	994,7	994,58
<b>Vazão dos Componentes (kg/h)</b>				
Carboidratos	3,78	3,78	0	3,78
Lipídeos	3,31	3,31	0	3,31
Inertes	0,28	0,28	0	0,28
Proteínas	1,6	1,6	0	1,6
Água	23,78	23,78	27,07	50,85
<b>Total (kg/h)</b>	<b>32,75</b>	<b>32,75</b>	<b>27,07</b>	<b>59,82</b>
<b>Total (L/h)</b>	<b>32,932</b>	<b>32,932</b>	<b>27,214</b>	<b>60,146</b>

**Fonte:** Elaboração própria a partir do relatório de balanço de material do *SuperPro Designer*®

Nome da corrente	Alimentação no biodigestor	Biogás bruto	Digestato bruto	Digestato p/ armazenagem
Origem	P-3	P-4	P-4	P-11
Destino	P-4	P-5	P-11	P-12
<b>Propriedades</b>				
Temperatura (°C)	25	37	37	37
Pressão (atm)	1,1	1,1	1,1	1,1
Densidade (g/L)	994,58	1,15	993,53	993,53
<b>Vazão dos Componentes (kg/h)</b>				
Amônia	0	0	0,083	0,083
Biomassa	0	0	1,395	1,395
Dióxido de carbono	0	5,802	0	0
Carboidratos	3,78	0	0	0
Lipídeos	3,31	0	0	0
Sulfeto de hidrogênio	0	0,002	0	0
Inertes	0,28	0,28	0	0,28
Metano	0	3,477	0	0
Proteínas	1,6	0	0	1,6
Água	50,85	0	48,78	48,78
<b>Total (kg/h)</b>	59,82	9,281	50,539	50,539
<b>Total (L/h)</b>	60,146	8065,888	50,868	50,868

Fonte: Elaboração própria a partir do relatório de balanço de material do *SuperPro Designer*®

Nome da corrente	Digestato p/ armazenagem	Biogás pré-seco	Biogás seco	Biogás pressão ambiente
Origem	P-12	P-5	P-6	P-7
Destino	OUTPUT	P-6	P-7	P-8
<b>Propriedades</b>				
Temperatura (°C)	37	40	25	25
Pressão (atm)	1,1	11,8	11,8	1,1
Densidade (g/L)	289,38	12,23	12,84	1,2
<b>Vazão dos Componentes (kg/h)</b>				
Amônia	0,083	0	0	0
Biomassa	1,395	0	0	0
Dióxido de carbono	0	5,802	5,802	5,802
Sulfeto de hidrogênio	0	0,002	0,002	0,002
Inertes	0,28	0	0	0
Metano	0	3,477	3,477	3,477
Água	48,78	0	0	0
<b>Total (kg/h)</b>	50,539	9,281	9,281	9,281
<b>Total (L/h)</b>	174,63	759,178	722,813	7753,812

**Fonte:** Elaboração própria a partir do relatório de balanço de material do *SuperPro Designer*®

Nome da corrente	Ar	Pré-dessulfurização	Resíduos do biofiltro	Biogás tratado	Biogás para uso
Origem	INPUT	P-8	P-9	P-9	P-10
Destino	P-8	P-9	OUTPUT	P-10	OUTPUT
<b>Propriedades</b>					
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
Pressão (atm)	1	1,1	1,1	1,1	1,1
Densidade (g/L)	1,18	1,09	1,18	1,09	1,09
<b>Vazão dos Componentes (kg/h)</b>					
Dióxido de carbono	0	5,802	0	5,802	5,802
Sulfeto de hidrogênio	0	0,002	0	0	0
Metano	0	3,477	0	3,477	3,477
Nitrogênio	0,615	0,615	0,615	0	0
Oxigênio	0,187	0,187	0,187	0	0
Enxofre	0	0	0	0	0
Ácido sulfúrico	0	0	0	0	0
Água	0	0	0	0	0
<b>Total (kg/h)</b>	0,802	10,083	0,804	9,279	9,279
<b>Total (L/h)</b>	680	9209,193	678,799	8527,817	7752,561

Fonte: Elaboração própria a partir do relatório de balanço de material do *SuperPro Designer*®

### Balanço geral dos componentes (kg/ano)

<b>Componente</b>	<b>Entrada</b>	<b>Saída</b>	<b>Balanço</b>
Amônia	0	657	-657
Biomassa	0	11,051	-11,051
Dióxido de carbono	0	45,952	-45,952
Carboidratos	29,938	0	29,938
Lipídeos	26,215	0	26,215
Sulfeto de hidrogênio	0	0	0
Inertes	2,218	2,218	0
Metano	0	27,538	-27,538
Nitrogênio	4,872	4,872	0
Oxigênio	1,479	1,467	12
Proteínas	12,672	0	12,672
Enxofre	0	11	-11
Ácido sulfúrico	0	11	-11
Água	402,732	386,346	16,386
<b>Total</b>	<b>480,125</b>	<b>480,122</b>	<b>3</b>

**Fonte:** Elaboração própria a partir do relatório de balanço de material do *SuperPro Designer*



## **APÊNDICE III FLUXOGRAMA DO PROCESSO**

