

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

CAIO REBULI DE OLIVEIRA
EDUARDO SILVA DE PAULA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM
DIGESTOR ANAERÓBIO DE MISTURA COMPLETA**

Vitória – Espírito Santo
2019

CAIO REBULI DE OLIVEIRA
EDUARDO SILVA DE PAULA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM
DIGESTOR ANAERÓBIO DE MISTURA COMPLETA**

Trabalho final, apresentado ao departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr.: Ricardo Franci Gonçalves

Coorientadora: Ma. Solaine Ramos Sampaio

Local, ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves
Universidade Federal do Espírito Santo

Ma. Solaine Ramos Sampaio
Universidade Federal do Espírito Santo

Dr. Mario Rodrigues Peres
Universidade Federal do Espírito Santo

Dr. Rodrigo Nunes Oss
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Somos gratos às nossas famílias pelo apoio que sempre nos deram durante toda as nossas vidas.

Aos nossos professores orientadores Ricardo e Solaine pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

Também queremos agradecer à UFES e o seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte das nossas formações, o nosso muito obrigado.

EPÍGRAFE

“Aprender é a única coisa que mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo Da Vinci

RESUMO

Frente ao crescimento da geração de resíduos no Brasil e no Mundo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e financeira de um digestor para metanização da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU) produzida por uma população de município idealizado do ES. O projeto considerou o atendimento destes usuários em um intervalo de 20 anos, considerando, neste intervalo, o crescimento populacional que chega em situação de final de plano à 11.413 habitantes. O sistema de metanização proposto considera o biorreator inserido em um sistema complexo de ciclo fechado, com captação do biogás para geração de energia elétrica e extração do biosólido para comercialização e uso agrícola. O tipo de reator foi escolhido analisando as melhores configurações indicadas pela literatura para o objetivo e cenário propostos. Desta maneira, foi dimensionado um Reator com Tanque Agitado Continuamente (CSTR), com agitação hidráulica e operando em faixa mesofílica, chegando-se a um volume de reator de 300 m³, com vazão operacional de 14,43 m³/dia, COV de 4 kgSV/m³reator.dia e Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) de 21 dias, produção de 442,92 m³ de biogás por dia e geração de 3.750 kg de biosólido por semana, em situação de final de plano. Adicionalmente foi exposto um manual de operação do biodigestor, apresentando recomendações para instalação e operação do reator dimensionado, sempre considerando as ações de segurança necessárias. Por fim, realizou-se análises financeiras quanto as viabilidades técnica e financeira do projeto, que se mostrou favorável em todas as análises.

ABSTRACT

Faced with the growth of waste generation in Brazil and worldwide, the present work focused on the technical and economic evaluation for an OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) bioreactor methanization system based on the waste produced by an average population of a municipality in the state of Espírito Santo, Brazil. The project took into account a 20-year span of operation, considering the population growth would reach 11,413 inhabitants in the end-of-plan situation. The proposed methanization system considered that the bioreactor would be inserted in a complex closed-loop system, with biogas uptake for electric power generation and biosolid extraction for commercialization and agricultural use. The reactor type was chosen by analyzing the best configurations indicated in the literature in light of the proposed objective and scenario. Thus, a CSTR-type anaerobic bioreactor with hydraulic agitation and mesophilic range was designed, reaching a reactor volume of 300 m³, with an operational flow rate of 14.44 m³ / day, VOC of 4 kgSV / m³reactor.day and 21 days HRT, a 442.92 m³ of biogas production per day and a 3,750 kg of biosolid production per week, in the end-of-plan situation. Additionally, a biodigester operation manual was created, presenting recommendations for installation and operation of the dimensioned reactor, always considering the necessary safety measures. Finally, financial analyzes were performed regarding the project's financial and technical feasibility, which came out favorable in all analyzes.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abrelpe – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV – Análise do Ciclo de Vida
AGV – Ácidos Graxos Voláteis
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BLC – Biodigestores de Lagoa Coberta
CAPEX – Capital Expenditure
CDR – Combustível Derivado de Resíduos
CH₄ – Metano
CO₂ – Dióxido de Carbono
COV – Carga Orgânica Volátil
CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor
DA – Digestão Anaeróbia
DQO – Demanda Química de Oxigênio
FORSU – Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos
GEE – Gases de Efeito Estufa
GPR – Gas Production Rate
H₂S – Sulfeto de Hidrogênio
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor
MMA – Ministério do Meio Ambiente
NBR – Normas Brasileiras
NR – Normas Regulamentadoras
ONU – Organizações das Nações Unidas
OPEX – Operational Expenditure
PERSES – Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo
Plansab - Plano Nacional de Saneamento Básico
PMGIRS – Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

Probiogás – Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

Prosab – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SEAMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SELIC – Sistema Especial de Liquidação e de Custódia

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SST – Segurança e Saúde no Trabalho

ST – Sólidos Totais

SVT – Sólidos Voláteis Totais

TIR – Taxa interna de Retorno

TRH – Tempo de Retenção Hdráulica

VP – Valor Presente

VPL – Valor Presente Líquido

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Fluxo da Gestão do Resíduo Sólido.....	19
Figura 3-2: Rotas de conversão da biomassa residual em energia.....	25
Figura 3-3: Esquema das principais etapas da digestão anaeróbia.....	28
Figura 3-4: Ciclo conservativo da Digestão Anaeróbica.....	29
Figura 3-5: Influência da temperatura sobre a digestão.....	35
Figura 3-6: Representação do modelo de biodigestor Indiano.....	38
Figura 3-7: Representação do modelo de biodigestor Chinês.....	39
Figura 3-8: Representação do modelo de biodigestor Canadense (BLC).....	40
Figura 3-9: Representação de um reator do tipo CSTR.....	41
Figura 3-10: Funcionamento dos diferentes modos de agitação para modelo CSTR.	42
Figura 3-11: Plataforma de recepção da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU), onde: a) desenho esquemático; b) vista geral da plataforma de recepção.....	44
Figura 3-12: Triturador industrial para FORSU.....	44
Figura 3-13: Exemplo de unidade de metanização de resíduos orgânicos: a) tanque de alimentação; b) bomba de alimentação/recirculação; c) reator de metanização; d) tanque de extração do lodo digerido.....	46
Figura 3-14: Prensa parafuso separadora sólido-líquido.....	46
Figura 3-15: Exemplo de sistema integrado de metanização de resíduos orgânicos a) plataforma de recepção da FORSU; b) reator de metanização; c) sistema de separação sólido-líquido; d) sistema de pós-tratamento de efluentes líquidos; e) plataforma de armazenamento, tratamento e aproveitamento energético do biogás.	47
Figura 3-16: Sistema de transporte do biogás: a) vista da tubulação de transporte; b) selo hídrico; c) medidor de fluxo de gases.....	47
Figura 3-17: Desenho esquemático da plataforma de armazenamento, tratamento e aproveitamento energético do biogás: a) sistema de dessulfurização; b) acumulador de biogás; c) compressor; d) reservatório pressurizado; e) sistema de cogeração; f) vista geral da plataforma de biogás.....	49

Figura 4-1: Projeção populacional para um município médio no ES de 10.000 habitantes.....	51
Figura 4-2: Sistema de metanização.....	57
Figura 5-1: Evolução temporal da produção de biogás.	72
Figura 5-2: Fluxo de massa do sistema de metanização.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Porcentagem da FORSU em diferentes localidades.....	20
Tabela 3-2: Composição típica do Biogás.....	30
Tabela 3-3: Equivalência entre o biogás e outros combustíveis comumente utilizados	31
Tabela 4-1: Densidade da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos de diferentes fontes.....	54
Tabela 4-2: Rendimento de metano da literatura a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos.....	57
Tabela 5-1: Principais parâmetros para o dimensionamento do biodigestor.....	68
Tabela 5-2: Parâmetros dimensionados.....	69
Tabela 5-3: Evolução temporal dos principais parâmetros de projeto.....	70
Tabela 5-4: Geração de energia com o biogás produzido.....	73
Tabela 5-5: Parâmetros operacionais e de projeto do biorreator.....	77
Tabela 5-6: Custos operacionais com recursos humanos e valores fixos e variáveis ao longo do tempo de projeto.....	83
Tabela 5-7: Receita total anual considerando o potencial energético do Biogás e a venda do Biosólido.....	84
Tabela 5-8: Fluxo de caixa do sistema de metanização proposto.....	85
Tabela 5-9: Valores calculados do Payback Descontado.....	86
Tabela 7-1: Receita anual total com a geração de energia e venda do biossólido – Parte 1.....	88
Tabela 7-2: Receita anual total com a geração de energia e venda do biossólido – Parte 2.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	GESTÃO E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	19
3.1.1	PANORAMA TECNOLÓGICO DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	20
3.1.2	PANORAMA BRASILEIRO	22
3.1.3	PANORAMA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO	23
3.2	DIGESTÃO ANAERÓBICA	24
3.2.1	FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA	25
3.2.2	APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA	29
3.2.3	BIOGÁS	30
3.3	BIODIGESTORES ANAERÓBICOS	32
3.3.1	PARÂMETROS PARA SELEÇÃO DOS BIODIGESTORES	32
3.3.2	TIPOS DE BIODIGESTORES	37
3.4	DESCENTRALIZAÇÃO DE SERVIÇOS	43
3.5	SISTEMAS DE METANIZAÇÃO	43
4	METODOLOGIA	50
4.1	POPULAÇÃO ATENDIDA	50
4.2	ELABORAÇÃO DO PROJETO DO REATOR	52
4.2.1	ESCOLHA DO REATOR	52
4.2.2	PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DO REATOR	53
4.3	SISTEMA DE METANIZAÇÃO	57
4.4	ANÁLISE ECONÔMICA	59
4.4.1	Payback Descontado	59
4.4.2	Valor Presente Líquido (VPL)	60
4.4.3	CAPEX E OPEX	60
5	RESULTADOS E DISCUÇÕES	65
5.1.1	MEMORIAL DE CÁLCULOS	65

5.1.2 FLUXOGRAMA E BALANÇO DE MASSA DO SISTEMA DE METANIZAÇÃO	74
5.1.3 DESCRIÇÃO DO BIOREATOR ANAERÓBIO	77
5.1.4 PLANTAS E DESENHOS.....	77
5.1.5 MANUAL DE OPERAÇÃO	77
5.2 ANÁLISE ECONÔMICA	82
5.2.1 CAPEX E OPEX	82
5.2.2 Receita	83
5.2.3 Fluxo de caixa	84
5.2.4 Payback Descontado	85
5.2.5 Valor Presente Líquido (VPL).....	86
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	87
7 ANEXOS.....	88
8 REFERÊNCIAS	94

ANEXOS

ANEXO I – Tabelas detalhadas da receita total anual em razão da geração de energia e venda de bio sólido.

ANEXO II – Plantas esquemáticas do sistema de tratamento da FORSU.

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX o crescimento populacional vem atingindo recordes, chegando a dobrar entre a década de 70 e a atual. Projeções da Organização das Nações Unidas indicam que o planeta chegará a 9,7 bilhões de habitantes em 2050. Ressalta-se que esse fenômeno ocorre principalmente em países em vias de desenvolvimento como o Brasil (ONU, 2019).

A expansão da sociedade humana aumenta a pressão sobre o meio ambiente, como, por exemplo, pela geração de resíduos sólidos, diretamente relacionada com o crescimento populacional. Na atual conjuntura social e cultural do consumo e da obsolescência dos produtos, os impactos ambientais causados pela geração e disposição inadequada dos resíduos sólidos são expressivos.

O relatório “*What a Waste 2.0*”, que discute sobre os problemas e os desafios do gerenciamento de resíduo sólidos, indica uma atual geração mundial de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano (BANCO MUNDIAL, 2018). Além disso, apresenta uma estimativa no qual até 2050 a geração crescerá cerca de 70%, atingindo uma geração anual de 3,4 bilhões de toneladas de resíduos (BANCO MUNDIAL, 2018).

Desta maneira, considerando as projeções de crescimento citadas, o incentivo à produção de estudos visando soluções tecnológicas no gerenciamento dos resíduos sólidos é crucial para atender a pauta de desenvolvimento sustentável, levantada em todo o mundo.

A Lei Federal 12.305 de 2010 estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil (PNRS), constituindo as obrigatoriedades e as diretrizes do gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no país, como, por exemplo, a implementação da coleta seletiva e a orientação na destinação final de resíduos (BRASIL, 2010).

Ressalta-se ainda que o Brasil se destaca quanto a utilização de tecnologias para produção de biogás através dos processos de tratamento de resíduos sólidos, como

também de esgotos sanitários, possuindo instrumentos de implementação destas tecnologias (PROBIOGAS, 2015). O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), por exemplo, tem o objetivo de contribuir para a ampliação do uso energético e eficiente do biogás no país.

Diante disso, salienta-se que a metanização ou digestão anaeróbia (DA) se destaca mundialmente como alternativa tecnológica para a mitigação dos efeitos dos Gases de Efeito Estufa (GEE), além de diversificar a matriz energética. Destaca-se que, o processo de consolidação da DA observado está associado à aplicação desta tecnologia em sistemas integrados, possibilitando a geração de energia e renda a partir dos resíduos orgânicos e seus subprodutos como o biogás e biossólido (agrícola ou energético) (PROBIOGÁS, 2015).

Visando a otimização desta tecnologia, busca-se no meio acadêmico e tecnológico o estabelecimento de parâmetros de projeto e operação que, de forma simples e econômica, assegurem o rendimento máximo de produção de metano.

Segundo Ferreira (2015), por se basear na digestão de material orgânico, os reatores de metanização apresentam-se como uma interessante solução para pequenas cidades e grandes fontes geradoras de resíduos orgânicos, tais como restaurantes populares, feiras livres, supermercados e centrais de abastecimento de alimentos.

Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e financeira de um reator anaeróbio para a metanização da FORSU gerada por uma população idealizada de uma pequena cidade do Espírito Santo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade técnica e econômica de um digestor anaeróbio de metanização da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos (FORSU).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Pesquisar na literatura os parâmetros de projeto e operação de reatores de resíduos orgânicos que proporcionem o melhor custo benefício da implantação do sistema, frente ao gerenciamento de resíduos;
- Dimensionar o reator para metanização da FORSU dentro das condições técnicas existentes e aplicáveis;
- Determinar a viabilidade financeira para a construção do sistema proposto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GESTÃO E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Como uma das principais metas, a PNRS estabeleceu inicialmente o prazo até 2020 para que o país tenha toda a estrutura necessária para dar uma destinação adequada a qualquer resíduo sólido (BRASIL, 2010).

Segundo a PNRS, o gerenciamento dos resíduos sólidos nas cidades é responsabilidade do Poder Público, devendo ser planejado através dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) (BRASIL, 2010). Existe, através dos PMGIRS, o estabelecimento do planejamento das ações de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Os princípios do PNRS moldam um fluxograma de prioridades quanto à gestão dos resíduos. Este fluxograma, que pode ser visto na Figura 3-1, considera, por ordem de prioridade, seis tipos de ações trabalhados pela PNRS e pelo Plano Nacional: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final em aterro (BRASIL, 2010).

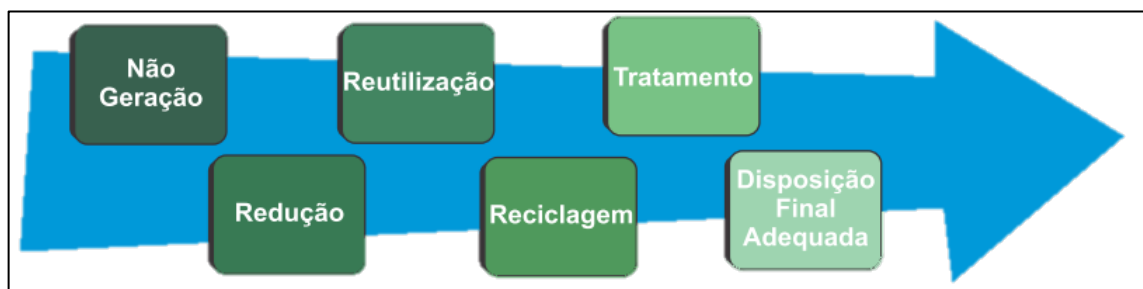


Figura 3-1: Fluxo da Gestão do Resíduo Sólido.
Fonte: Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Apesar de um crescente fortalecimento mundial de políticas ambientais nos últimos anos, é importante considerar que, em países em desenvolvimento, mais de 90% dos resíduos sólidos não são gerenciados de forma satisfatória (BANCO MUNDIAL, 2018). Estima-se que um terço deste resíduo são enviados para lixões ou mesmo incinerados sem o devido controle (BANCO MUNDIAL, 2018).

Segundo ABRELPE (2014) e SNIS (2017) cerca de 50 % dos resíduos sólidos urbanos do Brasil são resíduos orgânicos, sendo, de longe, a parcela mais significativa em relação a ocupação de espaço, acumulação de vetores e transmissão de doenças (BANCO MUNDIAL, 2018). A Tabela 3-1 apresenta valores de referência da FORSU de diferentes localizações:

Tabela 3-1: Porcentagem da FORSU em diferentes localidades.

Porcentagem da FORSU	Local	Referência
44,0%	Mundo	BANCO MUNDIAL (2018)
51,4%	Brasil	MMA (2011)
50,0%	Brasil	ABRELPE (2014); SNIS (2017)
41,9%	Porto Alegre	BIDONE E SOARES (2001)
65,5%	Belo Horizonte	SIMÕES ET AL. (2003)
60,7%	Rio de Janeiro	RIO DE JANEIRO (2005)
44,3%	Salvador	MACHADO ET AL. (2009)

3.1.1 PANORAMA TECNOLÓGICO DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a PNRs, quaisquer tecnologias visando a recuperação energética dos RSU pode ser utilizada no Brasil, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental em aprovação com o órgão ambiental responsável (BRASIL, 2010). Ainda assim, a disposição final ainda é a forma de destinação de resíduos mais utilizada, de forma que, no mundo, mais de 50% do resíduo gerado é disposto a céu aberto e em aterros (BANCO MUNDIAL, 2018).

No Brasil, em 2008, segundo a versão preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 58,3% dos resíduos domiciliares eram dispostos em aterros sanitários,

19,4% em aterros controlados e 19,8% em lixões, perfazendo um total de 97,5% dos resíduos com estas destinações (BRASIL, 2011), dessa forma, apenas 2,5% dos resíduos eram destinados a vias diferentes da disposição final em aterros ou lixões.

Apesar da situação apresentada, existem inúmeras vias tecnológicas que permitem o gerenciamento do resíduo diferentes da disposição em aterro e que se adequam ao previsto pela legislação brasileira. Apresenta-se, a seguir, os principais exemplos de destinação de RSU:

- **Triagem e Reciclagem:** Consiste no processo de classificação e aproveitamento do resíduo não orgânico; englobando a coleta, transporte, estocagem ou armazenamento, a separação e o tratamento dos resíduos a partir dos resíduos. Objetiva a reutilização ou a reciclagem de materiais como o papel, papelão, plástico, vidro e metais.
- **Compostagem:** Processo biológico de decomposição da matéria orgânica, o resultado final é um composto orgânico, podendo ser utilizado no solo sem ocasionar riscos ao meio ambiente.
- **Digestão anaeróbia:** Consiste na decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio em reatores de metanização. Esse processo tem várias tecnologias e produzem gases, como o metano, que servem de combustível, podendo ter fins energéticos ou industriais.
- **Incineração:** Processo que consiste na redução de peso e volume do resíduo através de combustão controlada. Esse método é mais associado ao tratamento de resíduos hospitalares e industriais.

Pontua-se que as opções de gerenciamento de resíduos criam um leque de vias para a gestão do RSU. Isto é, pode-se utilizar diferentes processos de destinação e disposição associados, afim de se chegar à melhor opção de destinação. Sistemas que reaproveitam, reciclam e tratam cada fração do resíduo gerado antes de dispor em aterros vêm crescendo no mundo. A PNRS, por exemplo, vem estabelecendo o fortalecimento deste tipo de sistema (BRASIL, 2010).

A capacidade de escolher o melhor sistema se dá a partir da análise dos objetivos dos países com uma definição de critérios a serem considerados. Estudos como o de Mersoni e Reichert (2017), visam analisar diferentes cenários para o

gerenciamento de RSU por meio da técnica de Análise do Ciclo de Vida (ACV), utilizando indicadores ambientais, como: mudanças climáticas, formação de foto-oxidantes, acidificação, eutrofização e toxicidade humana. Considerando estes parâmetros ambientais, os cenários que utilizavam tratamento dos resíduos, como compostagem e digestão anaeróbia foram os descritos como mais positivos (MERSONI; REICHERT, 2017).

Inúmeras vias para o gerenciamento de resíduos podem ser utilizadas, sendo a composição do resíduo um dos principais parâmetros na escolha da opção de maior viabilidade econômica. Assim sendo, considerando que a FORSU de um município pode atingir cerca de 50% do resíduo total gerado, uma opção de destinação que vem sendo tendência mundial é a digestão anaeróbica (PROBIOGÁS, 2015).

Segundo a ACV feita por Tiwary et al. (2015), o processo de DA possui aspectos interessantes quando comparado a outras tecnologias como compostagem, incineração e aterro sanitário, pois apresenta maior economia de recursos e menores impactos ambientais, devido à redução de gases de efeito estufa e menor toxicidade para os ambientes terrestres e aquáticos.

3.1.2 PANORAMA BRASILEIRO

Seguindo a tendência de crescimento populacional e de geração de resíduos mundial, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, Abrelpe (2017), o Brasil teve crescimento de 1% na geração diária total de RSU, e de 0,48% na per capita, entre 2016 e 2017. Com isto, a geração de resíduos em 2017 ultrapassou as 214 mil toneladas de resíduos anuais. Além disso, ressalta-se que todas as regiões brasileiras apresentaram crescimento, mostrando que a tendência que se repete regionalmente (ABRELPE, 2017).

O Brasil vem apresentando significativos números em relação a coleta de resíduos, atingindo um índice de 91% de coleta de resíduos em todo território, com as regiões Sul e Sudeste ultrapassando a taxa de 95% de coleta (ABRELPE, 2017). Vale ressaltar, entretanto, que apesar de representar taxas significativas, estima-se que

um total de 6,9 mil toneladas de resíduos não foram coletados no país e, conseqüentemente, tiveram destinação imprópria (ABRELPE, 2017).

Do total de resíduos coletados, cerca de 23% ainda são enviados para aterros controlados e 18% para lixões, mesmo após o país ter estabelecido em 2011, pelo PNRS, uma meta de eliminação total de lixões até 2014, 29% dos municípios brasileiros ainda possuem lixões (ABRELPE, 2017).

Ressalta-se que segundo o diagnóstico do manejo de RSU realizado por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), apenas 5,4% do resíduo coletado em 2017 seguiram para unidades de triagem e compostagem (SNIS, 2017).

Quanto o potencial socioeconômico, o gerenciamento de resíduos apresenta um alto potencial de geração de emprego e movimentação da economia, sendo que, apenas na área de limpeza urbana foram gerados no Brasil mais de 330 mil empregos em 2017, movimentando um total de 28,5 bilhões de reais (ABRELPE, 2017).

Com relação à geração per capita de RSU, a média Brasileira é de 1,035 kg/hab.dia pela (ABRELPE, 2017) e de 0,95 kg/hab.dia pelo (SNIS, 2017), enquanto que na região sudeste, o valor se encontra acima da média do país, tendo como média a geração de 1,217 kg/hab.dia de resíduo (ABRELPE, 2017). Além disso, ressalta-se que, assim como em todo o mundo, a maior parte do resíduo brasileiro é composto por matéria orgânica, chegando a 50% do total da massa de resíduos domiciliares gerados (ABRELPE, 2015; SNIS, 2017).

3.1.3 PANORAMA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS-ES) apresenta que o Estado teve geração de 861 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos no ano de 2017 (SEAMA, 2019). Neste mesmo ano, o SNIS informou que no estado do Espírito Santo, a massa de resíduos coletado da população urbana era de 0,89 kg/hab.dia (SNIS, 2017).

A gestão do RSU é feita majoritariamente, no estado do Espírito Santo, pela administração pública, sendo que 92% é realizada pela administração direta. Entretanto, existe forte terceirização nesta área, com cerca de 83% dos recursos anuais indo para o setor privado, para que este realize varrição de logradouros e coleta de resíduos domiciliares e públicos (SEAMA, 2019). A coleta convencional de RSU no estado abrange 95% da população (SEAMA, 2019), fazendo com que o Estado se coloque em boa posição com relação à média nacional..

3.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA

Digestão Anaeróbica (DA) é um processo natural que ocorre a partir da decomposição da matéria orgânica (CHERNICHARO, 2007). Acontece na ausência do oxigênio, através de distintas reações bioquímicas interdependentes, quando os compostos orgânicos complexos são degradados por diferentes grupos de microrganismos (CHERNICHARO, 2007).

Estas reações de fermentação, oxidação e redução são observadas tanto em ambientes naturais como pântanos, manguezais, trato intestinal de ruminantes, jazidas de petróleo, xisto e gás natural quanto em processos controlados de DA, chamados então de metanização (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 2007).

A aplicação da metanização tem se destacado principalmente pelo seu potencial em converter fontes de biomassa com elevada biodegradabilidade em biogás, passível de recuperação energética. Exemplos de biomassa que atendem essas características são: FORSU, resíduo alimentar, dejetos animais, material vegetal, esgoto doméstico e resíduos orgânicos industriais (FERREIRA, 2015). As rotas de conversão da biomassa residual em energia são ilustradas na Figura 3-2.

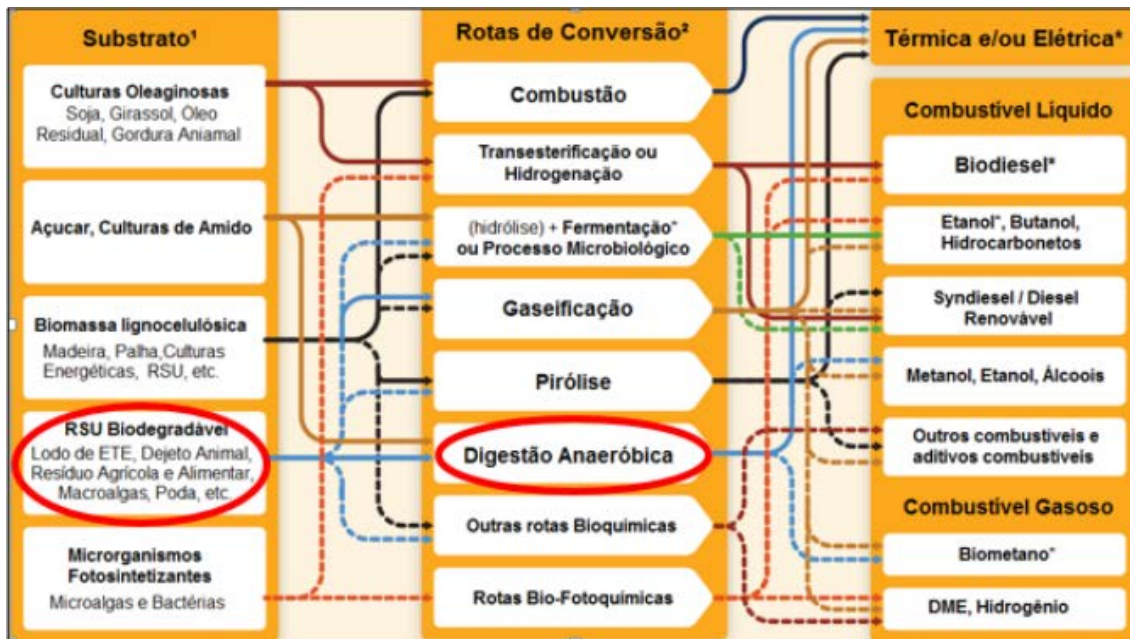


Figura 3-2: Rotas de conversão da biomassa residual em energia.
 FONTE: IPCC (2013)

3.2.1 FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA

A digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 2007).

Os microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididos em três importantes grupos, com comportamentos fisiológicos distintos: O primeiro grupo é composto de microrganismos fermentativos que transformam por hidrólise, os polímeros em monômeros, e estes em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos como glicose (CHERNICHARO, 2007).

O segundo grupo é formado pelas bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio, o qual converte os produtos gerados pelo primeiro grupo (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007).

Os produtos finais do segundo grupo são os substratos essenciais para o terceiro grupo, as *archeas metanogênicas*, que, por sua vez, constitui dois diferentes grupos. Um grupo que usa o acetato, transformando-o em metano e dióxido de carbono, enquanto o outro produz metano, através da redução do dióxido de carbono. Desta forma, o processo de DA pode ser subdividido em quatro fases principais, como a Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese (CHERNICHARO, 2007).

3.2.1.1 Hidrólise

Uma vez que as bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, a primeira fase no processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores) os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas (CHERNICHARO, 2007).

Esta conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos ocorre através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Na anaerobiose, a hidrólise dos polímeros usualmente ocorre de forma lenta, sendo vários os fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado, dentre os principais a temperatura e o pH (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994)

3.2.1.2 Acidogênese

Os produtos solúveis oriundos da fase da hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo em diversos compostos mais simples, os quais são então excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 2007).

Como os ácidos graxos voláteis são o principal produto dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas. A maioria das bactérias acidogênicas são anaeróbias estritas, mas cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato

orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias estritas são protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

3.2.1.3 Acetogênese

As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as *archeas metanogênicas*. Dessa forma, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato. Durante a formação dos ácidos acético e propiônico, uma grande quantidade de hidrogênio é também formada, fazendo com que o valor do pH no meio aquoso decresça (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

3.3.1.4 Metanogênese

A etapa final no processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas *archeas metanogênicas*. As metanogênicas utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio /dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de ácido acético ou metanol, e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, como a seguir: utilizadoras de acetato (acetoclásticas) e utilizadoras de hidrogênio (hidrogenotróficas) ((VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; CHERNICHARO 2007).

Além das fases descritas anteriormente, o processo de digestão anaeróbia pode incluir, ainda, uma outra fase, dependendo da composição química do despejo a ser tratado. Despejos que contenham compostos de enxofre são submetidos à fase de sulfetogênese (redução de sulfato e formação de sulfetos), conforme descrito a seguir (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994)

3.3.1.4 Sulfetogênese

Há também o processo de sulfetogênese, quando o meio reacional contiver quantidades significativas de sulfato (CASSINI, COELHO e PECORA, 2014). A Figura 3-3 apresenta as principais etapas da DA, considerando a sulfetogênese:

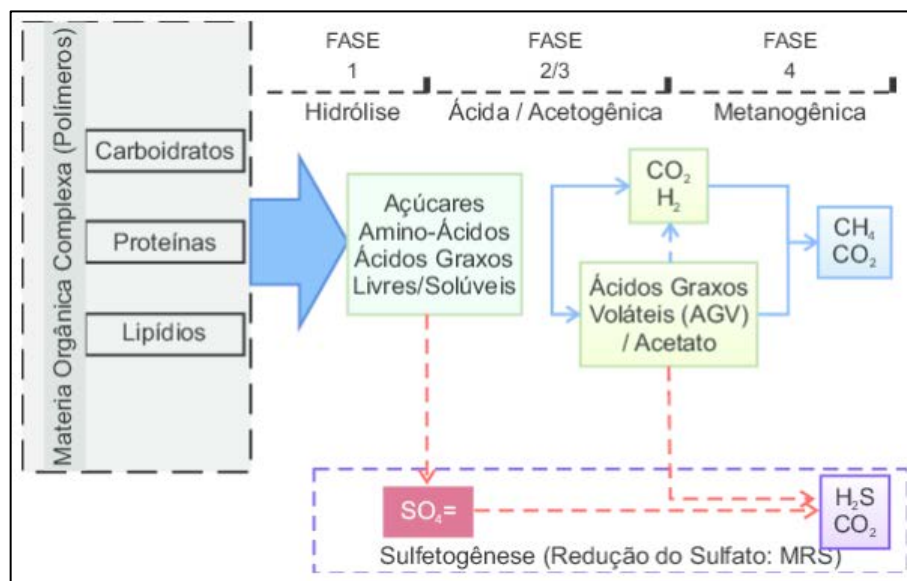


Figura 3-3: Esquema das principais etapas da digestão anaeróbia.
Fonte: CASSINI, COELHO e PECORA (2014)

A produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante este processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato (ou bactérias sulforedutoras) (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

As bactérias sulforedutoras são consideradas um grupo muito versátil de microrganismos, capazes de utilizar uma ampla gama de substratos, incluindo toda a cadeia de ácidos graxos voláteis, diversos ácidos aromáticos, hidrogênio, metanol, etanol, glicerol, açúcares, aminoácidos, e vários compostos fenólicos. As bactérias sulforedutoras dividem-se em dois grandes grupos Bactérias sulforedutoras que oxidam seus substratos de forma incompleta até o acetato e Bactérias

sulforedutoras que oxidam seus substratos completamente até o gás carbônico. (VISSER, 1995).

3.2.2 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA

A capacidade de valorização de biomassa e a produção de bioenergia coloca a DA no centro de um complexo de possibilidades de gerenciamento de subprodutos, em especial da fração orgânica dos resíduos como também do esgoto e seus subprodutos. A Figura 3-4 abaixo apresenta a DA inserida num ciclo tecnológico de aproveitamento de resíduos.

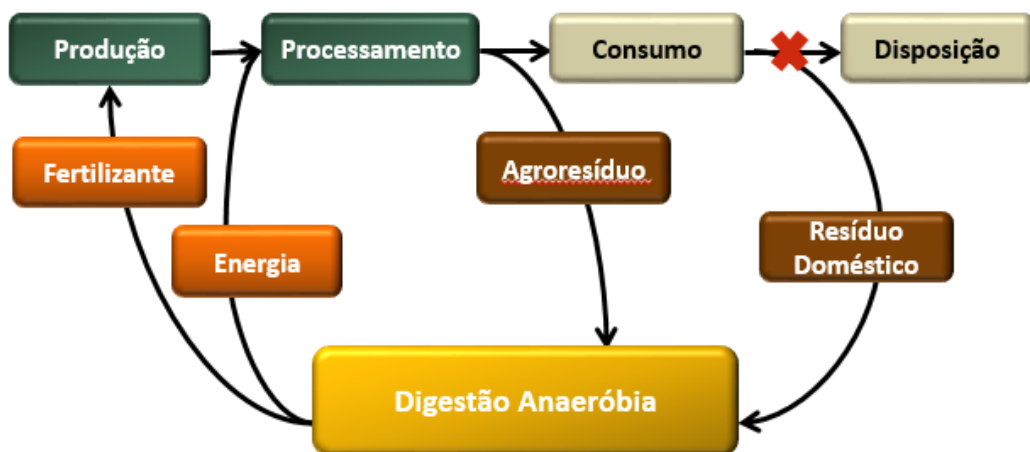


Figura 3-4: Ciclo conservativo da Digestão Anaeróbia
Fonte: Tiwary et al. (2015) adaptado, apud Sampaio (2019)

Neste modelo, a DA se torna elemento processual principal dos insumos, tanto na geração, quanto no aproveitamento dos resíduos (TIWARY et al., 2015). Desta maneira os autores discutem a ideia de quebra do processo linear geralmente utilizado, propondo um modelo circular e sustentável.

Como principal produto da DA, destaca-se a alta produção de biogás, combustível em grande ascendência nos últimos anos. Entretanto, vale ressaltar que trabalhos recentes sobre a DA mostram que não apenas o biogás, mas também o hidrogênio, ácidos graxos voláteis (AGV) e etanol podem ser produzidos a partir de RSU, lodo de esgoto ou estrume animal (LEI et al., 2015)

Além disso, o biogás tem sido visto como uma promissora fonte renovável de energia, pois, conforme relatado por Deublein e Steinhauser (2011), suas aplicações são diversas, entre elas:

- Conversão direta em energia elétrica;
- Queima direta, liberando calor em alta temperatura;
- Alimentação na rede de gás natural para fins de economia de energia ou uso como combustível para veículos, sendo distribuído por postos de gasolina.

3.2.3 BIOGÁS

O biogás é um gás natural resultante da decomposição da matéria orgânica, como, por exemplo, dejetos de animais, resíduos vegetais, resíduo industrial ou residencial em condições adequadas. Ressalta-se que o biogás é constituído por uma mistura de gases, com frações determinadas pelas características do resíduo e as condições de operação do processo de digestão (COLDEBELLA, 2006). A seguir, a Tabela 3-2 apresenta a composição típica do biogás.

Tabela 3-2: Composição típica do Biogás

Gás	Concentração no Biogás (%)	Efeitos
Metano (CH ₄)	50-80	- Aumenta o poder calorífico; - Intensifica efeito estufa.
Dióxido de carbono (CO ₂)	20 – 40	- Reduz o poder calorífico; - Causa corrosão se o gás estiver úmido.
Água (H ₂ O)	1 – 3	- Causa corrosão em equipamentos e encanamentos;
Nitrogênio (N ₂)	0,5 – 3	- Reduz o poder calorífico.
Gás sulfídrico e outros (H ₂ S, CO, NH ₃)	1 – 5	- Causa corrosão em equipamentos e encanamentos; - Gera a emissão de SO ₂ após combustão completa ou H ₂ S após a combustão incompleta; - Prejudica catalisadores.

Fonte: Coldebella (2006); Deublein e Steinhauser (2008).

É possível reparar que o biogás é basicamente composto por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sendo que o primeiro se destaca por ser um combustível gasoso com alto poder energético sendo utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica (ROCHA, 2016).

Em comparação com outros combustíveis o biogás apresenta-se como uma fonte de energia renovável, uma vez que é produzida pela degradação de resíduos orgânicos (ROCHA, 2016). Quanto à eficiência energética, o trabalho coordenado por Cassini (2003), do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), compara o biogás com outros combustíveis comumente utilizados, conforme apresentado na Tabela 3-3

Tabela 3-3: Equivalência entre o biogás e outros combustíveis comumente utilizados

Combustível à 25° C e 1 atm	Volume equivalente a 1 m³ de biogás à 25° C e 1 atm
Querosene	0,342 L
Lenha (10% umidade)	1,450 kg
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	0,396 L
Óleo Diesel	0,358 L
Gasolina	0,312 L

Fonte: Cassini (2003).

Segundo Deublein e Steinhauser (2011), a equivalência do biogás pode chegar a 0,65 L de petróleo por metro cúbico de biogás, o que corresponde a um poder calorífico de 23.380 kJ/m³ ou 6,5 kW/m³.

O biogás pode ser utilizado de várias maneiras e, cada uma exige uma qualidade e um grau de tratamento. Os possíveis usos em ordem de exigência de qualidade são: combustão direta, aproveitamento térmico, aproveitamento elétrico, injeção na rede de gás e como combustível (FNR, 2010).

O componente do biogás que traz maiores dificuldades operacionais e de uso é o gás sulfídrico (sulfeto de hidrogênio – H_2S), que pode atingir até 5% do volume total do biogás (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2011). Durante o processo de combustão ou contato com o ar, esse gás forma ácidos corrosivos que comprometem os equipamentos e tubulações, em geral instalados à jusante do reator. Desta forma,

para que não haja prejuízos aos componentes do sistema, o H₂S deve ser removido a concentrações inferiores a 200 ppm (ROCHA, 2016).

3.3 BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

Os biodigestores anaeróbicos podem ser definidos como um sistema fechado, sem presença de oxigênio, onde é feita a degradação da matéria orgânica por ação microbológica (REIS, 2012). Segundo Neves (2010), biodigestor é um reator ou câmara, construído de alvenaria, concreto ou outros materiais, onde há o controle e o monitoramento de parâmetros operacionais que viabilizam a fermentação e a degradação da biomassa, produzindo biogás como seu principal produto

Os biodigestores são projetados a partir da definição de um conjunto de parâmetros, possibilitando diferentes configurações. Entre os parâmetros, destaca-se a umidade (digestão úmida ou seca), o regime de alimentação (descontínuo ou contínuo), a presença ou ausência de co-substratos (co ou monodigestão), faixa de temperatura e outros (KOMILIS et al., 2017). A seguir, são apresentados os principais parâmetros considerados para o desenvolvimento de um sistema de metanização.

3.3.1 PARÂMETROS PARA SELEÇÃO DOS BIODIGESTORES

3.3.1.1 Regime de Alimentação

O regime de alimentação define o modo de operação de introdução do substrato ao reator, podendo operar de maneira contínua ou descontínua, sendo que o material digerido é removido constante ou periodicamente (COLTURATO et al., 2015).

Destaca-se que nos processos descontínuos (regime de batelada), o substrato é introduzido em certos montantes por vez e a extração do digerido é feito apenas no final de um certo período. Estes designs possuem, no geral, complexidade

operacional e valores mais acessíveis, sendo aplicados principalmente para operação seca, sem diluição do material (AMARAL, 2019).

3.3.1.2 Umidade

Outro importante parâmetro é a definição do teor de sólidos totais (ST) do substrato. Abassi-Guendouz et al. (2012) estabelece três categorias para o parâmetro umidade: úmida (<10% ST), semi-seca (10-20% ST) e seca (> 20% ST), sendo esta última relacionada com procedimentos em batelada.

Ressalta-se, contudo, que no atual panorama, a via úmida é a tecnologia mais comumente aplicada para os processos de digestão anaeróbica de diversos países com vistas ao gerenciamento de resíduos orgânicos, nos quais normalmente necessitam de diluição com água, insumos líquidos ou recirculação do digerido dentro do reator (CHIUMENTI; DA BORSO; LIMINA, 2018).

3.3.1.3 Número de estágios

Os biorreatores podem ser projetados em estágio de digestão anaeróbia única, isto é, um sistema onde todas as etapas (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) ocorrem em um único reator. Entretanto, pode-se ainda projetar um sistema com mais de um estágio, visando separar as etapas em diferentes reatores (COLTURATO *et al.*, 2015). Segundo Wang et al. (2018), a implementação de dois estágios em série, sendo um para os microrganismos acidogênicos e outro para os metanogênicos, é interessante para aumentar a eficiência da digestão.

Destaca-se que a operação de dois ou mais reatores em série acarreta uma maior complexidade operacional para manutenção das condições ótimas, o que requer maiores custos de investimentos e maior área para a instalação da unidade (COLTURATO *et al.*, 2015).

3.3.1.4 Tipo da digestão

Outro parâmetro fundamental é quanto ao tipo de digestão do substrato. Os processos da DA, depende, além de outros fatores, da composição do substrato, que pode ser composto com um tipo (monodigestão) ou de mais de um tipo de resíduo (codigestão).

De forma geral, a codigestão é apontada como mais eficiente em relação à monodigestão, ao proporcionar maior estabilidade aos processos (TIWARY et al., 2015). Em estudo realizado por Matheri et al., (2017), foi relatado que a codigestão da FORSU com estrume possibilitou o aumento dos nutrientes e da variedade bacteriana no substrato, que otimizou a DA, além de minimizar o tempo de retenção gerando maximização da produção de biogás.

3.3.1.5 Temperatura

A temperatura da digestão anaeróbia é um dos parâmetros mais importantes para o desempenho do processo, uma vez que afeta diretamente a velocidade do metabolismo das bactérias e o equilíbrio iônico do processo (CAMPOS, 1999). As faixas de temperatura variam conforme as seguintes classes: psicrófila (baixas temperaturas), mesófila (temperaturas moderadas) e termófila (altas temperaturas).

No trabalho de revisão de literatura de Komilis et al. (2017), identificou-se que cerca de 90% dos experimentos de DA com resíduos orgânicos ocorrem na faixa mesófila, o que está associado ao maior custo em processos termofílicos e a baixa eficiência nos processos psicrófilicos. Segundo Deublei e Steinhauser (2008), as duas principais faixas de reação metanogênica ocorrem entre 32 e 42°C (mesofílico) e 48 e 55°C, conforme os autores apresentam no gráfico exposto na Figura 3-5.

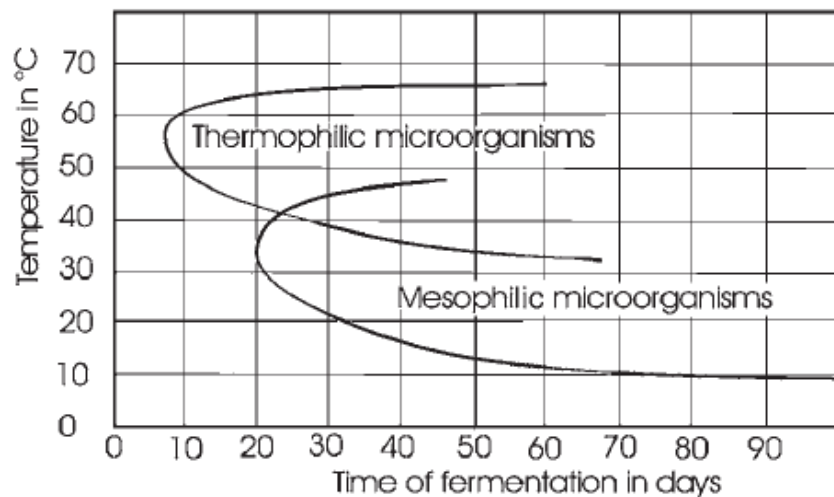


Figura 3-5: Influência da temperatura sobre a digestão.
 Fonte: DEUBLEI E STEINHAUSER (2008).

Segundo Tiwary et al. (2015), a operação termofílica de reatores permite uma maior eficiência no processo, com uma maior velocidade de reação, o que reduz o volume requerido pelo digestor. Entretanto, este tipo de operação requer fontes de calor, e logo, maiores gastos de energia. Ressalta-se ainda que em países tropicais, como o Brasil, o alcance de temperaturas mais elevadas é facilitado, possibilitando operação mesofílica sem a necessidade de aquecedores, o que reduz o custo de operação do sistema.

3.3.1.6 Pré-tratamento

A escolha de pré-tratamento apresenta-se como uma ação de suma importância no desenvolvimento de um sistema de metanização. Segundo Colturato et al. (2015) os resíduos destinados ao processo de DA precisam passar por um processo de triagem, de forma a garantir uma composição orgânica de qualidade para a metanização, isso inclui retirar partes plásticas, pedras e qualquer outra partícula maior que possa atrapalhar o processo.

Além da triagem, ainda podem ser empregados métodos de pré-tratamentos para acelerar o estágio inicial de hidrólise, que é a etapa tradicionalmente limitante nos processos anaeróbios que trabalham com alto teor de sólidos (KOMILIS *et al.*, 2017). Segundo Sampaio (2019), encontra-se na literatura diversos tipos de pré-

tratamento para DA, como por exemplo: térmicos, extração de lipídeos, pré-aeração, enzimático, físico, etc.

3.3.1.7 Relação substrato/inóculo

Para a inoculação de um reator é interessante o uso de uma biomassa anaeróbia já adaptada ao substrato e com elevada atividade metanogênica, pois tais condições otimizam o processo e garantem a estabilidade bioquímica da DA e a produtividade de biogás no digestor (FERREIRA, 2015).

Algumas alternativas de resíduos para o uso como inóculos, são: lodo mesofílico proveniente das estações de tratamento de esgotos, materiais de origem animal e outros que tenham abundância e diversidade de microrganismos anaeróbios e metanogênicos (SILVA, 2014).

Notou-se que essa relação pode variar consideravelmente a depender dos aspectos envolvidos no processo. Nesse sentido, Barcelos (2009) conclui que para a obtenção de um processo balanceado, a quantidade de inóculo a ser adicionada dependerá de sua atividade metanogênica e da taxa de produção inicial do substrato.

3.3.1.8 Material

A escolha do material de construção do reator é de extrema importância para o projeto, uma vez que este possui relação direta com seus custos de implantação e também com a segurança de operação deste (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Segundo Deublein e Steinhauser (2008), os reatores podem ser construídos de: concreto reforçado, blocos de concreto, placas de metal e plástico reforçado com fibra de vidro.

Dentre os materiais apresentados, os blocos de concreto e o concreto reforçado são os materiais mais baratos para a construção do biorreator, porém, o uso destes requer diversos cuidados na construção, uma vez que o uso de materiais de má

qualidade pode causar rachaduras ou tornar as paredes porosas (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Como forma de garantir a segurança do reator, é possível aplicar revestimentos polietileno de alta densidade, polipropileno ou de plástico reforçado com fibra de vidro, criando uma espécie de biorreator com parede dupla (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

3.3.2 TIPOS DE BIODIGESTORES

Classificações de biodigestores sob diversos aspectos, pela combinação de parâmetros sugeriram com o passar do tempo. Isto é, considerando as características físicas e operacionais, ou mesmo a combinação destas, um biodigestor pode ser caracterizado de acordo com sua configuração. Cita-se, como exemplo, os biodigestores modelo indiano, modelo chinês, modelo Canadense, modelo “Continuous Stirred Tank Reactor” (CSTR), do português Reator com Tanque Agitado Continuamente.

A seguir, são apresentados, de acordo com a literatura, os modelos de biodigestores para a produção de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos mais utilizados e estudados, no Brasil e no mundo.

3.3.2.1 Modelo Indiano

A Índia é conhecida como o primeiro país a utilizar, de maneira sistemática, os biodigestores para produção de biogás (ROCHA, 2016). Esta aplicação da tecnologia passou a ser utilizada no início do século XX, com a existência de 160 mil unidades implantadas no ano de 1992, segundo Rocha (2016).

Este tipo de biodigestor é caracterizado por possuir uma campanula flutuante e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras (PALHARES; GEBLER, 2014). A campanula é utilizada como gasômetro e fica mergulhada sobre

a biomassa em digestão, ou, em alguns casos, em um selo de água externo, que visa reduzir as perdas do processo de produção de gás (ROCHA, 2016).

Segundo Junqueira (2014), o modelo de biodigestor indiano apresenta facilidade construtiva, entretanto, o gasômetro de metal pode encarecer o custo final e inviabilizar o projeto de instalação do mesmo. A representação desta estrutura pode ser vista na Figura 3-6 a seguir:

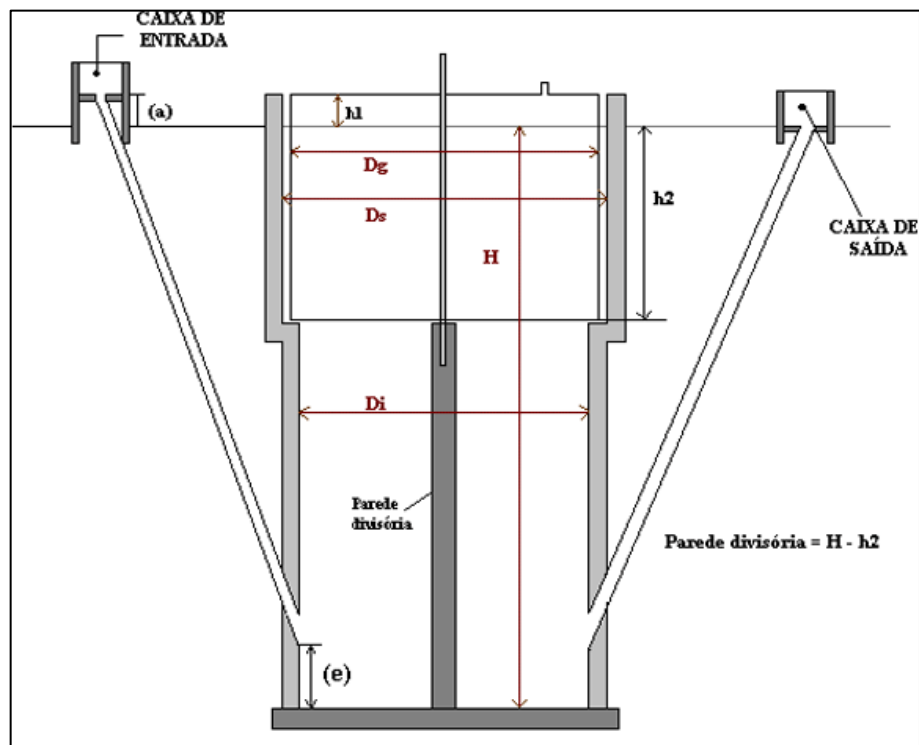


Figura 3-6: Representação do modelo de biodigestor Indiano.

Fonte: Deganutti et al. (2002)

Onde: "H" é a altura do nível do substrato; "Di" é o diâmetro interno do biodigestor; "Dg" é o diâmetro do gasômetro; "Ds" é o diâmetro interno da parede superior; "h1" é a altura ociosa (reservatório do biogás); "h2" é a altura útil do gasômetro; "(a)" é a altura da caixa de entrada; "(e)" é a altura de entrada do cano com o afluente.

3.3.2.2 Modelo Chinês

O modelo Chinês, por sua vez, é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria com teto impermeável, que serve como ambiente para a fermentação do substrato. Neste sistema o funcionamento é baseado no princípio de prensa hidráulica, isto é, devido a geração e acúmulo de gás, o efluente é deslocado para a caixa de saída, e em sentido contrário em caso de descompressão (REIS, 2012). A seguir, a Figura 3-7 apresenta um biodigestor do modelo chinês.

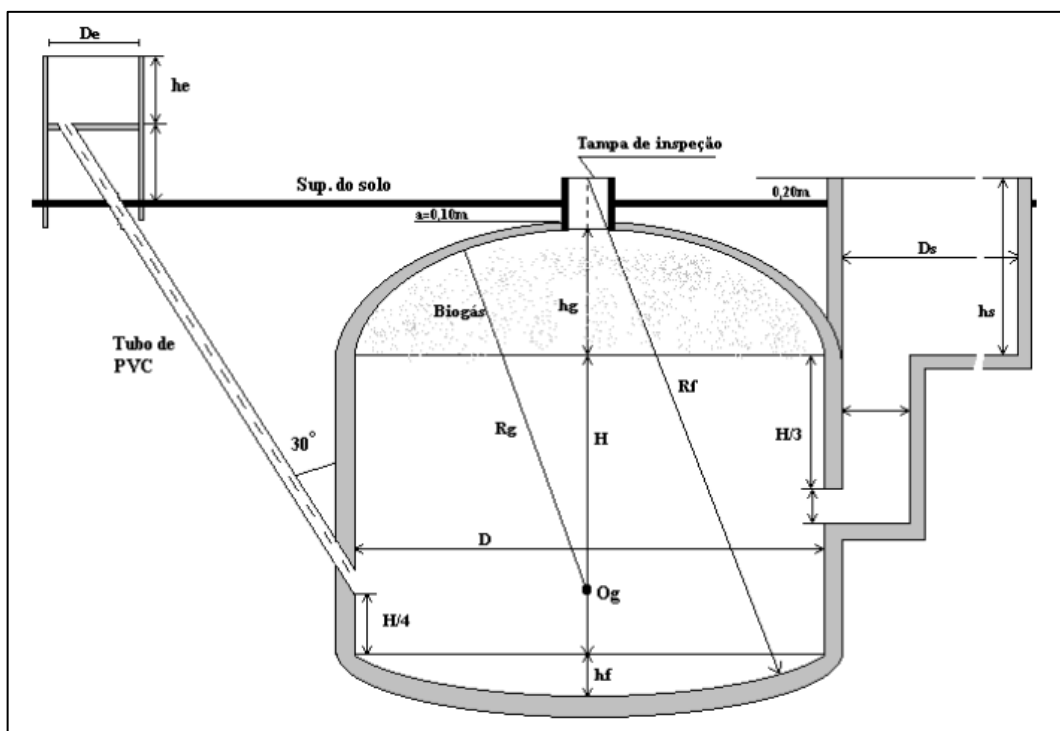


Figura 3-7: Representação do modelo de biodigestor Chinês.

Fonte: Deganutti et al. (2002)

Onde: “D” é o diâmetro do corpo cilíndrico; “H” é a altura do corpo cilíndrico; “Hg” é a altura da calota do gasômetro; “hf” é a altura da calota do fundo; “Of” é o centro da calota esférica do fundo; “Og” é o centro da calota esférica do gasômetro; “he” é a altura da caixa de entrada; “De” é o diâmetro da caixa de entrada; “hs” é a altura da caixa de saída; “Ds” é o diâmetro da caixa de saída; “a” é o afundamento do gasômetro.

Tanto o modelo Chinês, quanto o Indiano apresentam funcionamento e desempenho semelhantes, com ambos funcionando com taxas de até 8 % de ST e são conhecidos pela facilidade construtiva, com bom custo benefício para fins rurais e de baixo porte (DEGANUTTI et al., 2002)

3.3.2.3 Modelo Canadense (Biodigestor de Lagoa Coberta)

Os biodigestores de lagoa coberta (BLC), usualmente denominados como biodigestor “canadense” ou “de lona” são caracterizados por uma câmara de digestão escavada no solo, impermeabilizada e coberta com material geossintético (PVC, PEAD, etc.) marcado pela baixa permeabilidade a fluídos e gases, e suficientemente flexível para acumular biogás. (AMARAL et al., 2019). Conforme apresentado por Deganutti et al. (2002), possuem geometria com base retangular de seção trapezoidal com inclinação do talude variável de acordo com as características do solo, como apresentado pela Figura 3-8.

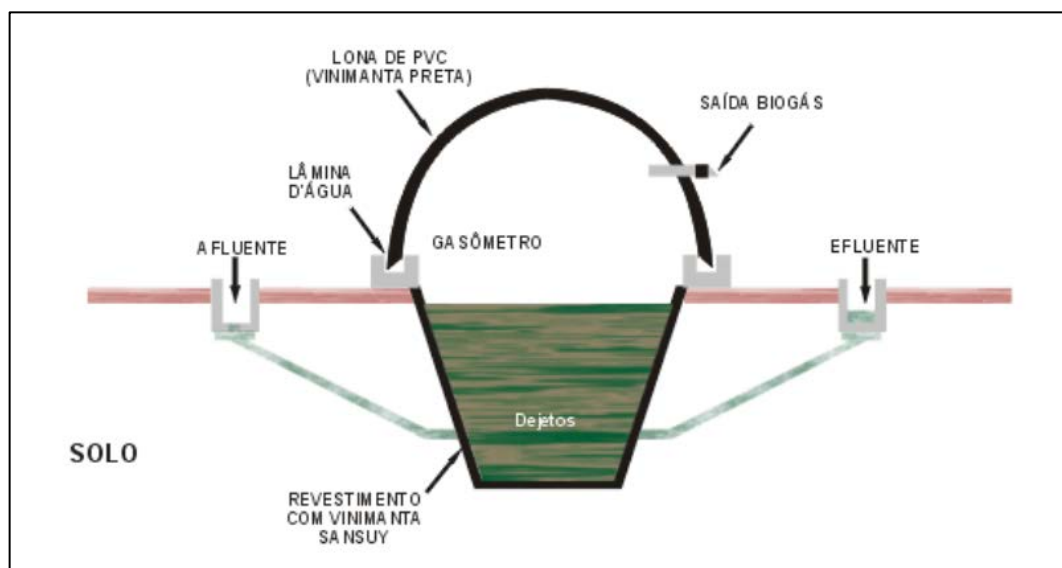


Figura 3-8: Representação do modelo de biodigestor Canadense (BLC).

Fonte: Deganutti et al. (2002)

A medida que há produção de biogás, a cúpula geossintética maleável infla e o biogás é acumulado, podendo ser ainda enviado a um gasômetro separado a fim de que se obtenha um maior controle operacional (JUNQUEIRA, 2014).

Além disso, Junqueira (2014) ressalta que o biodigestor canadense é do tipo horizontal, onde a profundidade é menor que a largura, para que o substrato tenha maior exposição ao sol, aumentando a produção de biogás e evitando o entupimento do duto de entrada.

3.3.2.4 Modelo CSTR

O Reator com Tanque Agitado Continuamente, do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR), é caracterizado por ter seu conteúdo homogeneizado devido à presença de sistema de agitação. Segundo Amaral et al. (2019), o CSTR é a configuração de biodigestor mais utilizada em plantas de biogás, sobretudo nas que utilizam substratos em concentração de sólido próximo a 10%. A Figura 3-9 apresenta o esquema de funcionamento de um biorreator do tipo CSTR:

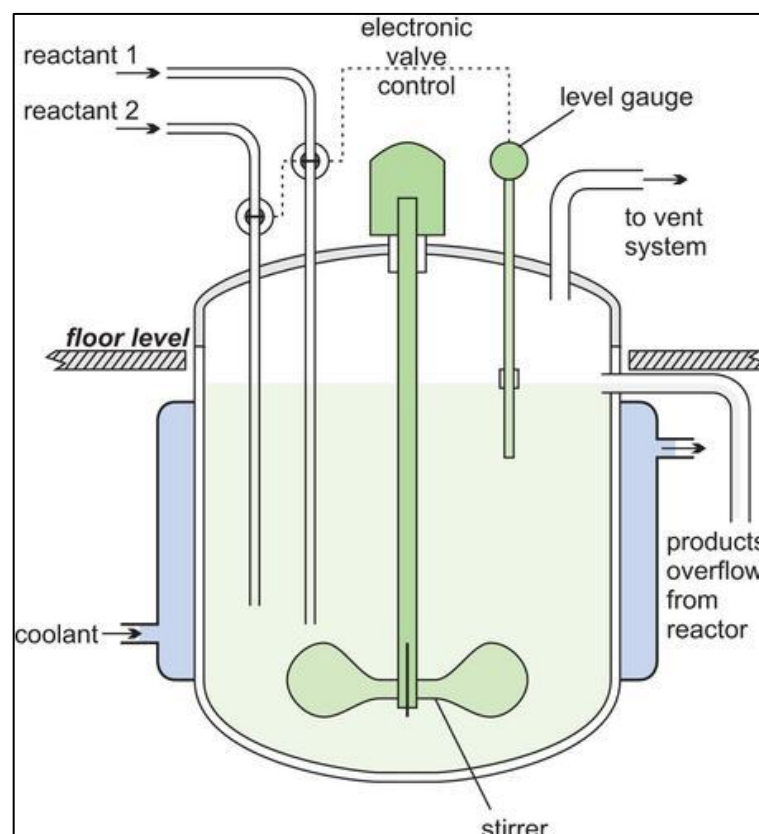


Figura 3-9: Representação de um reator do tipo CSTR.

Partindo do pressuposto que não há acúmulo de lodo nos reatores anaeróbios do tipo CSTR, devido sua agitação, o tempo de retenção hidráulica (TRH) e o tempo de

retenção de sólidos (TRS) são iguais, possuindo geralmente um valor mínimo entre 15 e 20 dias (AMARAL et al., 2019).

Ressalta-se ainda que, devido ao sistema de agitação e manutenção de temperatura, o modelo CSTR possui maiores custos de implantação e manutenção. Entretanto, estes custos também estão relacionados com o também aumento da capacidade de estabilização e manutenção da população de microorganismos, que por sua vez aumentam a produção de biogás do sistema (AMARAL et al., 2019).

Com relação ao sistema de agitação contínuo no modelo CSTR, Amaral et al. (2019) apresenta três diferentes modos de operação, sendo eles:

- A agitação hidráulica (...) ocorre com a recirculação do interior do biodigestor por meio de bombas hidráulicas localizadas na parte interna ou externa do reator CSTR.
- A agitação pneumática (...) é estabelecida em função da recirculação de biogás, causando homogeneização no meio reacional por borbulhamento no líquido ou por processo conhecido como *gas lift*.
- A agitação mecânica (...) é a mais utilizada nas plantas de biogás e pode apresentar diferentes intensidades e modelos de agitadores (...)

Funcionando conforme esquema apresentado na Figura 3-10 abaixo:

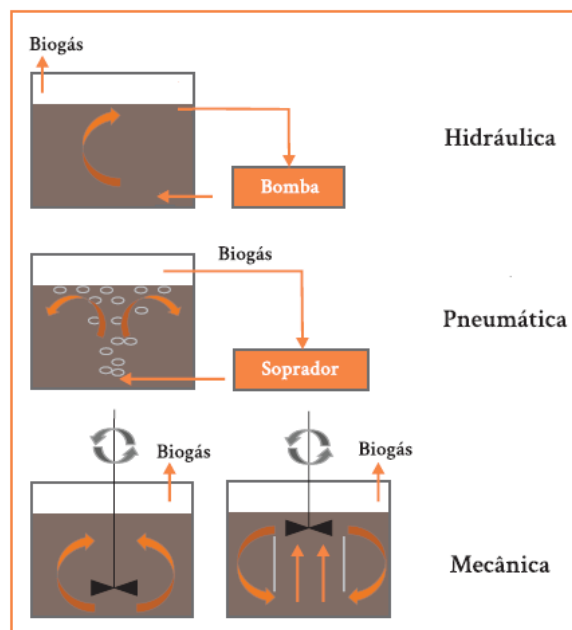


Figura 3-10: Funcionamento dos diferentes modos de agitação para modelo CSTR.

Fonte: AMARAL (2019) modificado.

3.4 DESCENTRALIZAÇÃO DE SERVIÇOS

Segundo Philippi (2000), atualmente, a infraestrutura do saneamento brasileiro é centralizada, tanto em nível administrativo quanto tecnológico, privilegiando grandes projetos e com baixos níveis de atendimento para populações carentes e rurais.

Uma forma de combater os baixos níveis de atendimento, segundo Faria et. al. (2007) e Paz (2015), são os modelos descentralizados, que são bem-sucedidos para a obtenção da universalização dos serviços, além de envolverem a comunidade local em seu funcionamento, uma vez que atuam a níveis municipais. Pelo fato dos modelos serem descentralizados e atraírem a comunidade, tem-se como benefícios “a racionalização do uso dos recursos públicos, humanos e naturais; a ativação de capacidades ociosas disponíveis nas comunidades”, assim como o uso de tecnologias mais adaptadas para a localidade (PHILLIPI, 2000).

Bel e Mur (2009) apontam que, apesar do projeto ser descentralizado, é possível que exista uma espécie de cooperação entre localidades que não possuam uma população grande o bastante para utilizar a capacidade total de determinado projeto. A cooperação municipal acaba por diminuir os custos estimados para o funcionamento dos projetos, sendo que esses custos são reduzidos em maiores níveis quando municípios com menores populações cooperam entre si (BEL; MUR, 2009). Tal cooperação deixa de influenciar nos custos quando a interação ocorre entre municípios de 10 a 20 mil habitantes, uma vez que os custos aqui já estão diluídos por um número elevado de habitantes.

3.5 SISTEMAS DE METANIZAÇÃO

Inicialmente, no sistema de tratamento dos resíduos é necessário o acondicionamento dos mesmos nas residências e sua posterior coleta, tal serviço é realizado normalmente pelas prefeituras através do seu sistema de coleta (SEAMA, 2019).

Após esses procedimentos, tem-se a chegada do resíduo sólido ao sistema de tratamento (Figura 3-11), sendo que o primeiro procedimento a ser realizado após a chegada é a trituração do resíduo, por meio de triturador industrial (Figura 3-12), com o objetivo de reduzir seu tamanho e favorecer a DA (JACINTO, 2014).



Figura 3-11: Plataforma de recepção da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU), onde: a) desenho esquemático; b) vista geral da plataforma de recepção.

Fonte: FERREIRA (2015).



Figura 3-12: Triturador industrial para FORSU.

Fonte: JACINTO (2014).

Na etapa seguinte à trituração, o resíduo deve ser encaminhado para um tanque de homogeneização, que também servirá como tanque de alimentação, nesta etapa o substrato é preparado para possuir teor de ST ideal para o modelo de biodigestor utilizado (FERREIRA, 2015). A homogeneização poderá ocorrer por meio de recirculação, na qual se usa a própria bomba de alimentação para recircular este substrato (FERREIRA, 2015), ou por meio de um sistema de agitação ou mistura (CARNEIRO, 2009) (Figura 3-13).

Conforme destaca Ferreira (2015), quando o sistema de bombeamento do sistema é utilizado para a homogeneização ela também pode realizar função tripla no sistema: a primeira de homogeneizar o substrato, realizando a recirculação deste dentro do tanque de alimentação; a segunda de recircular a massa líquida dentro do biodigestor, retirando essa massa do ponto mais alto e bombeando para o ponto mais baixo; a terceira de alimentação do reator, transferindo o substrato do tanque de alimentação para o ponto mais baixo do biodigestor.

Após o biodigestor, o efluente digerido segue para ser estocado em um reservatório, chamado de tanque de extração, para que seja redirecionado para outro tratamento, uma vez que sua utilização direta no solo não é vista como uma boa medida a ser tomada (JACINTO, 2014) (Figura 3-13). No tanque de extração, os sólidos e líquidos se encontram misturados, devendo passar por um sistema de separação sólido-líquido para ocorrer sua valorização, podendo esse sistema de separação ser uma prensa parafuso (JACINTO, 2014; FERREIRA, 2015) (Figura 3-14).

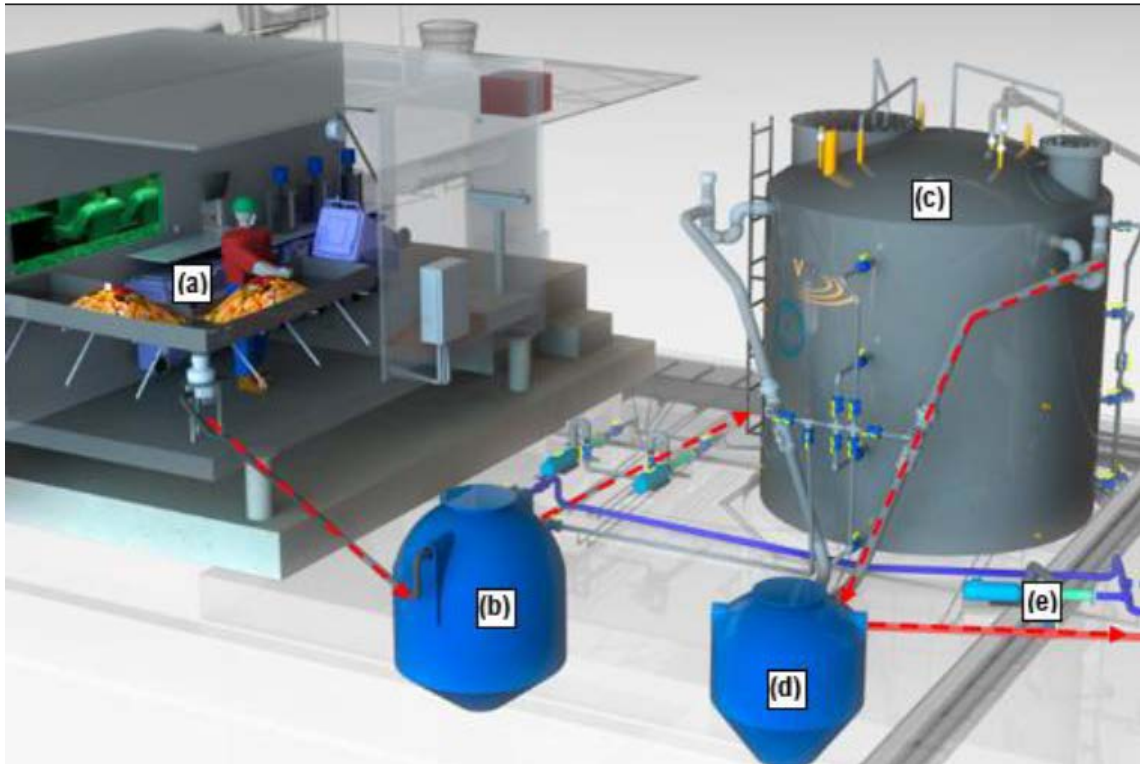


Figura 3-13: Exemplo de unidade de metanização de resíduos orgânicos: a) tanque de alimentação; b) bomba de alimentação/recirculação; c) reator de metanização; d) tanque de extração do lodo digerido.

Fonte: FERREIRA (2015).



Figura 3-14: Prensa parafuso separadora sólido-líquido.

Fonte: JACINTO (2014).

A fração sólida deverá ser enviada para local adequado para a realização de algum tipo de tratamento que a estabilize, como por exemplo, a compostagem, leito de secagem ou bolsa de desidratação, que permitirá que o material seja valorizado e vendido posteriormente (CARNEIRO, 2009). A fase líquida poderá ser reutilizada para diluir os resíduos presentes no tanque de homogeneização, para chegar à

porcentagem necessária de ST ótima para o biorreator ou ser utilizada como fertilizante líquido, necessitando passar anteriormente por um processo de tratamento para que sejam retirados patógenos (JACINTO, 2014) (Figura 3-15).

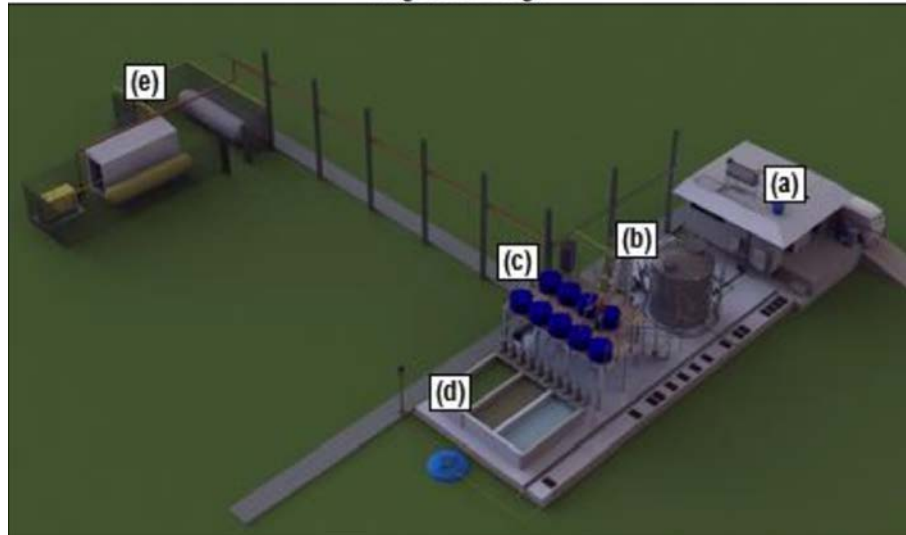


Figura 3-15: Exemplo de sistema integrado de metanização de resíduos orgânicos a) plataforma de recepção da FORSU; b) reator de metanização; c) sistema de separação sólido-líquido; d) sistema de pós-tratamento de efluentes líquidos; e) plataforma de armazenamento, tratamento e aproveitamento energético do biogás.
Fonte: FERREIRA (2015).

A fração gasosa, representada pelo biogás, é direcionada para um selo hídrico, que tem função de atuar como uma etapa de segurança e também como um garantidor da pressão interna de funcionamento do biodigestor. A próxima etapa após o selo é o medidor de fluxo, que determinará a produção de biogás, e também válvulas para a retirada de amostras, que são utilizadas para a verificação da composição do biogás (FERREIRA, 2015) (Figura 3-16).

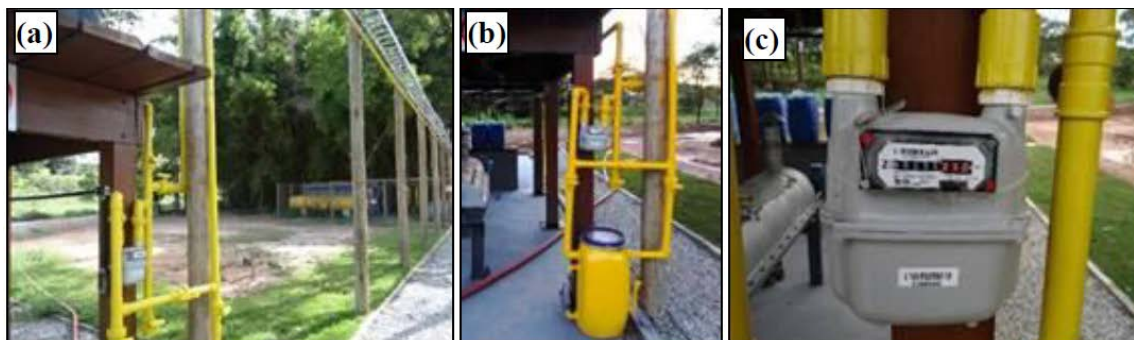


Figura 3-16: Sistema de transporte do biogás: a) vista da tubulação de transporte; b) selo hídrico; c) medidor de fluxo de gases.
Fonte: FERREIRA (2015).

Após a etapa de medição, existem quatro alternativas de uso para o biogás: sua queima direta no *flare* (FERREIRA, 2015); a combustão direta, para aproveitamento térmico do calor gerado para manter a temperatura do biodigestor; a produção de energia elétrica e calor (co-geração); a venda do biogás (CARNEIRO, 2009).

Para as hipóteses de queima do biogás se faz necessário um tratamento prévio deste, a fim de dar mais valor a ele ou tornar este menos danoso para os equipamentos que farão uso dele para a geração de energia (CARNEIRO, 2009). Conforme menciona Carneiro (2009), a concentração de sulfeto de hidrogênio presente no biogás pode formar compostos corrosivos, que podem acabar gerando danos aos equipamentos.

Em razão do exposto anteriormente, o biogás passa, após o medidor de fluxo, por um sistema físico de dessulfurização, para a retirada do sulfeto de hidrogênio presente na composição do gás, que causaria danos aos equipamentos seguintes do sistema (FERREIRA, 2015). Após passar pelo sistema físico de dessulfurização, o biogás é armazenado em reservatório intermediário não pressurizado, a fim de acumular o volume mínimo para a compressão do gás (FERREIRA, 2015) (Figura 3-17).

Por fim, o biogás é direcionado para um gasômetro, onde é estocado em pressão maior que a atmosférica por meio de um compressor, uma vez que será direcionado posteriormente para um motor para a geração de energia elétrica, caso seja esse o uso desejado (JACINTO, 2014) (Figura 3-17).

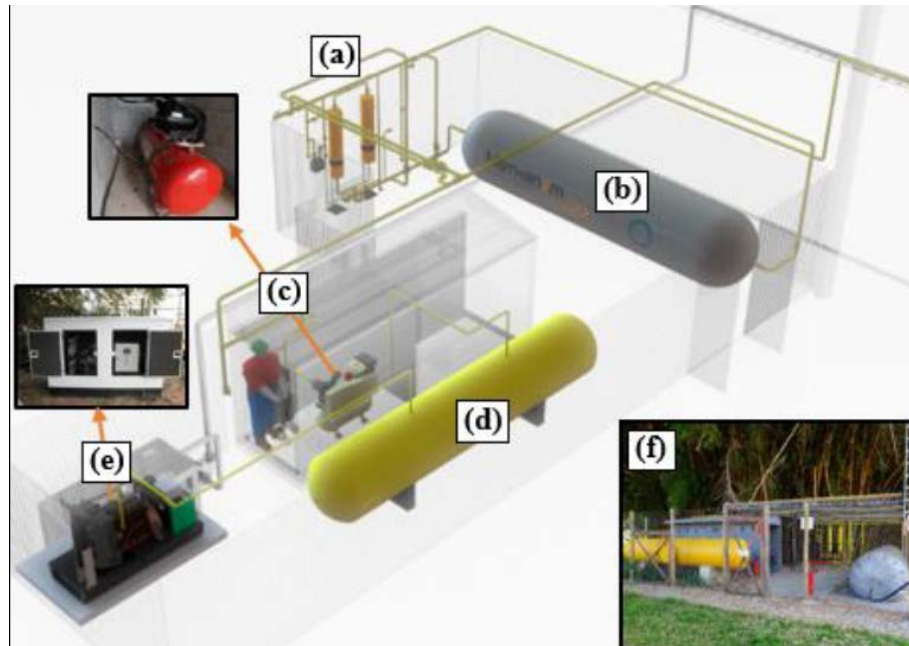


Figura 3-17: Desenho esquemático da plataforma de armazenamento, tratamento e aproveitamento energético do biogás: a) sistema de dessulfurização; b) acumulador de biogás; c) compressor; d) reservatório pressurizado; e) sistema de cogeração; f) vista geral da plataforma de biogás.

Fonte: FERREIRA (2015).

4 METODOLOGIA

4.1 POPULAÇÃO ATENDIDA

A análise de escolha do cenário de atuação do projeto é parte extremamente importante no desenvolvimento deste trabalho, uma vez que é a partir deste que se verifica o número de usuários, e as condições para qual o projeto deve ser dimensionado.

Segundo Ristoff (2006) as universidades possuem um papel de colocar a pesquisa em função do desenvolvimento social, cultural e econômico, dessa forma, optou-se pela escolha de uma população no Estado do Espírito Santo, aplicando para isso as taxas de crescimento presentes no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS-ES) (SEAMA, 2019).

Diante desta escolha, aplicar-se-á à população escolhida as taxas de crescimento populacional do Estado do Espírito Santo como um todo, levando em consideração que a população a ser atendida pelo projeto cresce proporcionalmente igual a do estado.

As taxas de crescimento foram obtidas a partir do PERS-ES, onde foram determinados diversos cenários de crescimento populacional para o Espírito Santo, dentre os quais, os autores indicaram o cenário 7 e 14 (SEAMA, 2019). Optou-se pelo cenário 7 indicado pelos autores para obtenção das taxas de crescimento do Espírito Santo, uma vez que, segundo a SEAMA (2019), este leva em consideração características demográficas como esperança de vida média, fecundidade média, migração inicialmente crescente nos próximos anos e decrescente nos últimos quinquênios das projeções, além de se comportar com uma curva logística com limite de saturação de 5 milhões de habitantes.

Com vistas à descentralização, optou-se arbitrariamente por uma população de 10 mil habitantes no ano de 2018, que será chamada de população ideal e crescerá

conforme as taxas de crescimento do Estado do Espírito Santo, como explicado anteriormente.

Por se tratar de um projeto de engenharia, é necessário realizar tal análise populacional em longo prazo. Comumente, tais projeções são realizadas em um horizonte de 20 anos, vez que este período de tempo está relacionado com os recursos financeiros aportados, a manutenção da obra, assim como com os planos de saneamento, que segundo a Lei 11.445/2007 em seu art. 52, § 2º, devem ser elaborados com horizonte de 20 anos (BRASIL, 2007).

Considerou-se o ano de início do projeto o ano de 2020, dessa forma, a população ideal obtida para o ano de 2018 deverá ser atualizada de acordo com a taxa de crescimento geral do Espírito Santo para esses anos, obtida no PERS da SEAMA (2019). A população projetada para o ano de início do projeto foi de 10.241 habitantes, em razão de um crescimento no Estado do Espírito Santo de 2,41%, conforme o Cenário 7, indicado pela SEAMA (2019).

O mesmo processo foi realizado para encontrar a população de 2020 foi repetido para os anos de 2025, 2030, 2035 e 2040, obtendo-se a população destes anos conforme a Figura 4-1:

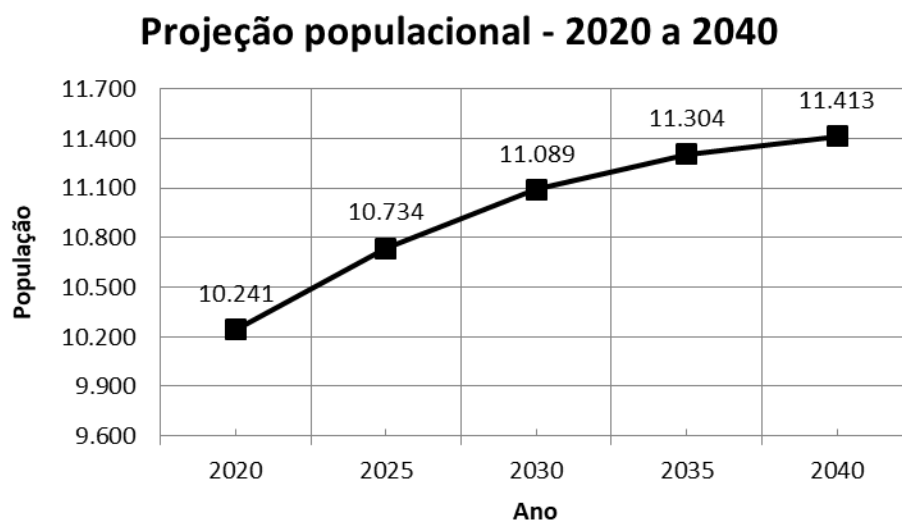


Figura 4-1: Projeção populacional para um município médio no ES de 10.000 habitantes.

Fazendo uso do método exposto acima, obteve-se que o reator deverá ser capaz de atender uma população de 11.413 habitantes para continuar a apresentar os benefícios já referidos quando da seleção da população de 10 mil habitantes.

4.2 ELABORAÇÃO DO PROJETO DO REATOR

Nesta sessão serão apresentadas as considerações para o dimensionamento do reator anaeróbio. Será considerado, para fins metodológicos, o reator inserido no cenário discutido anteriormente.

4.2.1 ESCOLHA DO REATOR

Para escolha da melhor tecnologia a ser utilizada como biorreator do sistema deve-se considerar diversos fatores, como: características físico-químicas do substrato, os objetivos do tratamento, os custos e logística do projeto, o local de instalação da planta, dentre outros.

Considerando as informações expostas na sessão 3.3 e a sessão 4.1, de tratamento da FORSU de uma população de 11.413 habitantes, optou-se pela utilização de um digestor anaeróbio do tipo CSTR com as seguintes características: regime de alimentação contínua, um estágio, monodigestão de FORSU com pré-tratamento de trituração, operação úmida (10 % ST), faixa de temperatura mesofílica e construído com material de alvenaria (concreto) revestido com fibra de vidro. Além disso, será considerado um sistema de agitação pelo método hidráulico

O modelo CSTR se destacou por ser recomendado na digestão de maiores vazões, como será necessária para a população usuária definido. Os demais reatores avaliados são, em geral, utilizados para menores vazões, no uso rural, por exemplo. Além disso, a configuração escolhida visou priorizar a produção de biogás, o custo benefício, a logística e a segurança do digestor.

4.2.2 PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DO REATOR

4.2.2.1 Parâmetros do Cenário Proposto

Como apresentado anteriormente, será considerado o cenário de um município espírito santense, considerando uma projeção de crescimento populacional de 20 anos. Estima-se, nessa situação uma população de 11.413 habitantes geradores de resíduo sólido urbano.

Além disso, será considerado um cenário ideal de coleta e segregação dos resíduos gerados. Segundo dados do SNIS (2017), no ano de 2016 o estado do Espírito Santo teve média de coleta de 0,89 kg_{RSU}/hab.dia, com índice de coleta de 95% conforme dados apresentados no PERSES (SEAMA,2019).

Desta maneira, considerando uma coleta de 100% para o estado, estima-se uma geração de 0,94 kg_{RSU}/hab.dia, valor similar a geração média brasileira, que segundo a Abrelpe (2017) foi de 0,95 kg_{RSU}/hab.dia. Considera-se ainda, como apresentado anteriormente uma fração orgânica do RSU no Brasil de 50% (SNIS, 2017).

4.2.2.2 Parâmetros do Substrato

Conforme cenário proposto e escolha do tipo de biorreator para o sistema de metanização, será utilizado no sistema um substrato composto por 100% de FORSU diluído e misturado com água até atingir 10% de ST. Dessa forma, considera-se:

4.2.2.2.1 Sólidos Totais da FORSU

A porcentagem de sólidos totais que compõem os resíduos orgânicos, segundo a literatura, varia na faixa de 23,1 a 30,9 % (ZHANG et al., 2007; LI et al., 2011; BROENE et al., 2012; KIGOZI et al., ZHANG et al., 2013).

Desta maneira, ponderando os valores reportados, para fins de cálculo, será considerado o teor de 25% de ST para a Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos (FORSU).

4.2.2.2.2 Relação SV/ST

A relação de sólidos voláteis sobre os sólidos totais (SV/ST), que compõem diferentes substratos de resíduos orgânicos, segundo a literatura, varia na faixa de 88 a 95% (SOTTI, 2014; KIGOZI et al., 2014; MALINOWSKY, 2016).

Desta maneira, considerando os valores reportados. para fins de cálculo, será utilizado neste trabalho o valor de 90% de SV/ST para o substrato composto por FORSU. Ressalta-se que o trabalho de Malinowsky (2016), que indicou uma faixa de 85 a 90% de SV/ST, considera também um substrato composto apenas por FORSU.

4.2.2.2.3 Densidade de FORSU triturada

Apesar da dificuldade de se calcular a massa específica de resíduos sólidos urbanos, alguns estudos buscam formas de se estimar esse parâmetro. Campuzano e Simón (2016) apresentam a densidade de diferentes fontes de FORSU, que podem ser observadas na Tabela 4-1 a seguir:

Tabela 4-1: Densidade da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos de diferentes fontes.

Fonte de FORSU	Densidade (kg/m³)
Separado manualmente	750
Separado através de equipamento mecânico	810
Amostra seca (105°)	666
Resíduo alimentar	513

Neste trabalho, deve-se considerar ainda o processo de trituração da FORSU, utilizado como pré-tratamento. Dessa forma, considerando ainda o trabalho de Vilela (2015) que encontra a densidade de FORSU triturada a 868,25 kg/m³. Para este trabalho será considerada uma densidade de 840 kg/m³, resultado da média do trabalho de Vilela (2015) e da FORSU separada através de equipamento mecânico de Campuzano e Simón (2016),

4.2.2.3 Parâmetros Operacionais do Biorreator

4.2.2.3.1 Carga Orgânica Volátil (COV)

A Carga Orgânica Volátil do reator representa a quantidade em massa de material orgânico inserido com possibilidade de volatizar (transformar em gás). Essa fração pode ser representada em quantidade de SV ou de DQO. Este trabalho expressará a COV em massa de SV do substrato inserida ao sistema por dia:

$$COV = \frac{C \cdot Q}{V}$$

Onde:

COV – Carga Orgânica Volátil em $kg_{sv}/m^3 \cdot dia$;

C – Concentração de sólidos voláteis do substrato em kg_{sv}/m^3 ;

Q – Vazão de substrato em m^3/dia ;

V – Volume útil do reator em m^3 .

Segundo Palhares & Gebler (2014), biodigestores de alto rendimento, como reatores do tipo CSTR apresentam COV entre 1 e 4 $kg_{sv} \cdot m^{-3}_{reator} \cdot d^{-1}$. Desta maneira, o dimensionamento do digestor irá considerar atender esta faixa de recomendação de COV.

4.2.2.3.2 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

O TRH corresponde ao tempo que o efluente permanece no interior do reator anaeróbico para ser digerido. Esse tempo varia conforme tipo de substrato, e as características de operação do processo.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Onde:

TRH – Tempo de retenção hidráulica em dias;

Q – Vazão de efluente em m³/dia;

V – Volume útil do reator em m³.

Segundo Amaral et al. (2019) reatores do tipo CSTR devem possuir um valor mínimo de TRH entre 15 e 20 dias. Desta maneira, o dimensionamento do digestor irá considerar atender esta faixa de recomendação de TRH mínimo.

4.2.2.3.3 Taxa de Produção de Gás (Gas Production Rate – GPR)

Descreve a razão entre o biogás produzido, por unidade de volume de reator, em um determinado tempo. O parâmetro GPR visa apresentar a eficiência e produtividade da geração de biogás o biorreator, podendo ser calculado um valor real através da vazão de gás produzido. Para o dimensionamento, este parâmetro pode ser utilizado para a previsão da produção de gás, através de estimativas de referência. O GPR pode ser descrito da seguinte maneira:

$$GPR = \frac{Q_{Biogás}}{V}$$

Onde:

GPR – Taxa de produção de gás (m³ gás/m³ reator.dia)

Q_{Biogás} – Vazão de biogás (m³ /dia)

V – Volume útil do reator em m³ (metro cúbico).

Malinowsky (2016) apresenta a produção de biogás em relação com a carga de SVT do substrato adicionado ao sistema. Segundo o autor, biodigestores em uso de FORSU produzem, em média 367 m³ por tonelada de SVT do substrato, isto é 0,367 m³/kg_{SVT}. Desta maneira, a estimativa de produção de biogás irá considerar o valor recomendado por Malinowsky (2016).

Para comparação, Ferreira (2015), que chegou a um rendimento médio de 354 m³CH₄/tSV, apresenta uma série de trabalhos que reportam o rendimento a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, ilustrado a seguir, na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Rendimento de metano da literatura a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos.

Produção (m ³ CH ₄ /tSV)	COV (kgSV.m-3.d-1)	TRH (dias)	Referência
367	2,0	30	Cho et al. (1995)
396	4,0	20	Zang et al. (2011)
541	3,0	30	Li et al. (2013)
234-496	1,0 – 3,0	30	Ferreira (2015)

Fonte: FERREIRA (2015).

4.3 SISTEMA DE METANIZAÇÃO

Apesar do objetivo central deste presente trabalho ser o projeto do biorreator, para o seu funcionamento de acordo com os padrões esperados, é necessária uma estrutura ao seu redor, garantindo a correta alimentação de substrato, assim como a remoção do material do interior do reator. É importante destacar que aqui não foram realizados os dimensionamentos dos equipamentos do pré e do pós-tratamento, mas apenas a indicação de equipamentos necessários, sendo estes os presentes no fluxograma abaixo.

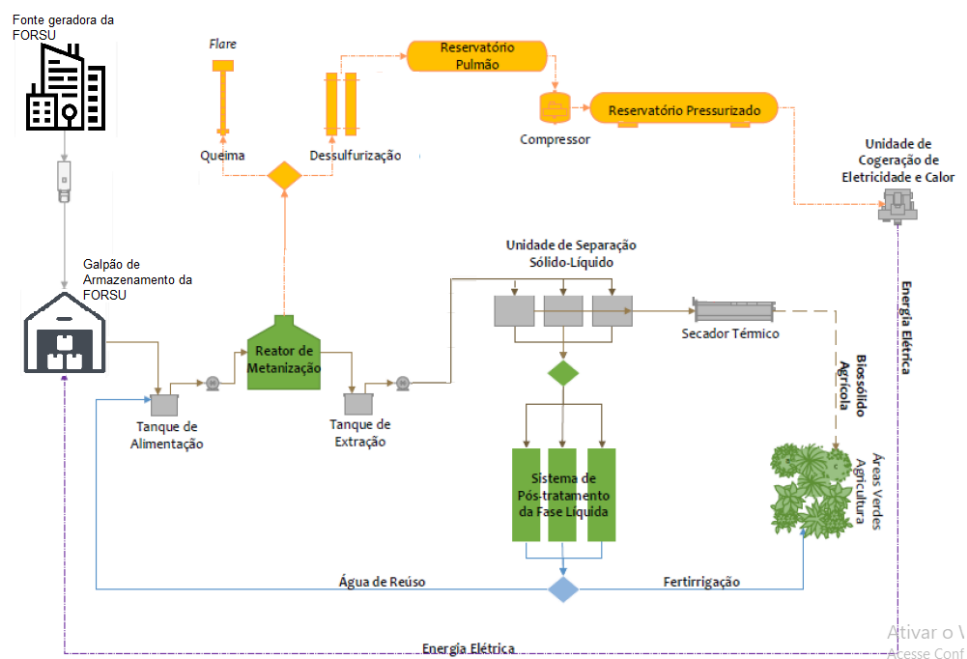


Figura 4-2: Sistema de metanização.
Fonte: FERREIRA (2015) modificado.

No presente sistema de metanização não será considerada a etapa de triagem do resíduo, uma vez que está se considerando o material que chega até o sistema como totalmente triado pelo serviço público. Dessa forma, o resíduo chegará até o galpão de armazenamento de FORSU totalmente triado.

Após o galpão, o resíduo será triturado por meio de um triturador industrial e enviado para o tanque de alimentação, onde será homogeneizado até que se torne um substrato ideal para o reator. Para o presente projeto será considerado um sistema de bombeamento para a recirculação no tanque de alimentação, responsável pela homogeneização, e outro, separado, que realiza a alimentação e a recirculação no biodigestor, esta escolha foi feita buscando evitar que substrato já passado pelo biorreator volte à caixa de alimentação.

Seguinte ao reator, o biogás será enviado para um sistema de dessulfurização ou para um *flare*, sendo este último utilizado apenas quando o sistema de estocagem do biogás estiver com sua carga máxima, evitando assim acidentes. No sistema de estocagem de biogás, a destinação de gás será o gasômetro, que operará em uma pressão semelhante à definida por Ferreira (2015), sendo ela de 9,2 bar, que equivale a 9,08 atm.

Para o dimensionamento do gasômetro será utilizada uma relação empírica encontrada na literatura, sendo essa relação entre o volume do digestor e o volume do gasômetro de 6:1 ou 5:1, conforme se verifica no trabalho de Kossmann et al. (1997), aplicando a este trabalho a primeira.

A fração sólida e líquida, após o reator, será enviada para um separador sólido líquido chamado de prensa parafuso, sendo que posteriormente à esta etapa a fração sólida será enviada para bolsa de desidratação para ser transformado em biossólido. A fração líquida será enviada para uma lagoa de polimento para o pós-tratamento, esta lagoa será anaeróbia.

4.4 ANÁLISE ECONÔMICA

Os métodos de análise econômica são diversos, porém, alguns exigem critérios e dados precisos, enquanto outros não necessitam de informação tão discriminada, dessa forma, a avaliação aqui realizada será feita com base nos testes de Payback Descontado e Valor Presente Líquido (VPL).

Os referidos custos deverão ser lançados no fluxo de caixa do projeto, sendo este “às entradas e saídas de caixa durante determinado período” (TRACY, 2000), de modo a permitir que sejam utilizados os três métodos propostos acima. Como o tempo de projeto definido para o biorreator foi de 20 anos no item 4.1, o fluxo de caixa deverá contar com as entradas e saídas de investimentos por todo esse período.

Para a construção do fluxo de caixa, se considerou como a taxa de juros/ custo de oportunidade das receitas a taxa referencial do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) atual, que se encontra em 5% segundo o Banco Central do Brasil (2019).

4.4.1 Payback Descontado

O primeiro método de análise a ser utilizado é o Payback Descontado, sendo utilizado apenas como uma referência para a tomada de decisão e não como um índice analítico. O Payback Descontado indica o tempo necessário para que os investimentos realizados sejam recuperados, não mostrando, no entanto, a rentabilidade auferida ou os resultados de fluxos futuros estimados (ASSEF, 1999).

O método do Payback Descontado visa corrigir uma deficiência do método do Payback simples, que não considera o valor do dinheiro no tempo, por meio a aplicação da taxa mínima de atratividade aceita pelo investidor. Dessa forma, o resultado deste método mostra o tempo necessário para a recuperação do investimento considerando uma taxa de juros atrativa para o investidor, sendo mais adequado que sua modalidade simplificada (LIMA et al., 2013).

4.4.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Tracy (2000) descreve o VPL como o capital inicial investido em um projeto menos o valor presente dos investimentos futuros nesse mesmo projeto. Para identificar se o projeto é ou não viável para investimento, basta verificar se o VPL obtido é maior que zero, indicando que existirão ganhos com a realização do projeto.

Para o cálculo do VPL, deve-se usar a seguinte equação:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - FC_0$$

Onde:

FC_t – Fluxo de caixa na data t (R\$);

FC_0 – Investimento inicial (R\$);

r – Custo de oportunidade do investidor.

O custo de oportunidade do investidor é a taxa mínima de atratividade considerada por cada investidor, servindo para que o método leve em consideração o valor do dinheiro no tempo, trazendo todos os valores para a data presente (LIMA et al., 2013).

4.4.3 CAPEX E OPEX

Para a realização da análise econômica do projeto de reator de digestão anaeróbia devemos inicialmente ter em mente que os custos para tal obra são divididos em duas categorias, os custos de implantação e os de operação. Como ensinam Jordão e Pessoa (2011), os custos de implantação, que são os de construção, equipamentos e montagem e os custos de operação e manutenção, que são os com pessoal, energia, produtos químicos, manutenção preventiva e transporte e disposição de lodo.

Para a determinação do *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure* OPEX, foram levantados preços da mão de obra nacional e valores adotados em projetos semelhantes, como o de Rosenfeldt et al. (2016), Zanin, Bagatini e Pessatto (2010) e Dennehy (2017), dentre os quais se entendeu ser o primeiro o mais adequado, vez que apresenta maior gama de valores. Em seu trabalho, Rosenfeldt et al. (2016) apresenta um sistema de metanização semelhante com o aqui proposto, sendo que, em razão deste fato, será considerado o trabalho do mesmo para a determinação dos custos deste projeto.

4.4.3.1 CAPEX

Segundo Rosenfeldt et al. (2016), um projeto que contém uma unidade de: triagem de recicláveis e de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), metanização para tratamento da fração orgânica, separação de fases do lodo digerido e pós-tratamento diferenciado das fases sólida e líquida para uma quantidade de 50 mil toneladas de resíduos por ano, possui um custo total de implantação (CAPEX) de R\$ 49.869.000,00.

Ocorre que, no presente custo, está inclusa uma unidade de triagem de recicláveis e de CDR, unidades estas que no presente trabalho já se consideram instalados, de forma que o resíduo chega até ao sistema de metanização já triado. Em razão disso, é possível retirar os valores destas unidades do valor total de implantação, o que resulta em um novo valor de R\$ 34.152.000,00 para uma unidade de tratamento de 50 mil toneladas de resíduos por ano, perfazendo um gasto de R\$ 683,00 de investimento em implantação por tonelada de resíduo tratado anualmente

Como o projeto realizado neste trabalho é de menor escala, tratando 1.958 toneladas por ano, em seu último ano de projeto, decidiu-se por aplicar o fator de investimento (R\$ 683,00/t) para a identificação do CAPEX.

Estão inclusos neste valor de implantação, segundo Rosenfeldt et al. (2016) a:

- Técnica de Construção (infraestrutura predial);
- Biodigestor;
- Técnica de processo (logística);

- Tratamento e aproveitamento de biogás;
- Eletrotécnica;
- Despesas adicionais ou imprevistas;
- Técnica móvel (maquinário).

É importante ressaltar que o CAPEX deverá ser reajustado de acordo com o índice de inflação IPCA (Índice de Preço ao Consumidor Amplo) de 3,50% a.a. até o final do ano de 2019, uma vez que os valores estimados datam do ano de 2016.

4.4.3.2 OPEX

Para um projeto de mesmas dimensões do aqui tratado, Rosenfeldt et al. (2016) estabelece valores de custos operacionais divididos em custos de recursos humanos e custos variáveis e fixos, sendo este último dividido em: energia, água e esgoto, insumos, gestão de instalação, consertos/manutenção e seguros. Os valores são apresentados em R\$/t, tornando fácil sua adaptação para o presente trabalho, vez que basta a consideração da quantidade de FORSU tratado por ano para encontrar os valores de OPEX anuais.

Com relação aos custos com recursos humanos, optou-se pela presença dos seguintes profissionais na operação do sistema de metanização, obtendo seus salários atualizados (R\$/hora) por meio de pesquisa em site de empregos (VAGAS, 2019):

- 1 Engenheiro/Gestor de operações (29,98 R\$/hora)
- 1 Mecânico eletricista (13,24 R\$/hora)
- 1 Operador de máquinas (Biodigestor, Metanização e outros equipamentos) (13,15 R\$/hora)
- 1 Auxiliar de serviços gerais (6,56 R\$/hora)

Para a obtenção dos salários anuais dos empregados, foi considerado um jornada de 8 horas por dia e 254 dias úteis por ano, perfazendo um total de 2032 horas de trabalho por ano.

Foi considerado que o engenheiro/gestor de operações poderia trabalhar em 10 sistemas de metanização, como uma forma de redução de custo e de tempo ocioso, obtendo então um salário de 6.091,20 R\$/ano por cada sistema trabalhado e um total de 60.912,00 R\$/ano, somados todos os 10 sistemas.

Com relação ao mecânico eletricitista e o auxiliar de serviços gerais, entendeu-se que estes podem ser responsáveis pelo trabalho em até 5 sistemas de metanização, tendo então um salário anual de 5.380,80 R\$/ano e 2.664,00 R\$/ano por cada sistema trabalhado, respectivamente. Com relação ao salário total, levando em consideração o trabalho em 5 sistemas de metanização, o mecânico eletricitista receberia 26.904,00 R\$/ano e o auxiliar de serviços gerais 13.320,00 R\$/ano.

Com relação ao operador de máquinas, este deverá trabalhar por todo o expediente apenas em um sistema de metanização, desta forma, este receberá um salário total de 26.712,00 R\$/ano.

É importante ressaltar que foi considerado que o engenheiro/gestor de operação pode ser responsável por até 10 sistemas de metanização, sendo uma forma de redução de custos, uma vez que o salário total deste será de R\$ 60.912,00 ao ano. Com relação ao mecânico eletricitista e o auxiliar de serviços gerais, entende-se que estes podem ser responsáveis por até 5 sistemas de metanização, sendo o salário total do primeiro de R\$ 26.904,00 ao ano e do segundo R\$ 13.320,00.

Com relação aos custos variáveis e fixos, Rosenfeldt et al. (2016) apresentou um valor de 30,69 R\$/t para um sistema que contém apenas uma unidade de triagem de recicláveis e de CDR e de 49,70 R\$/t para um sistema semelhante ao dimensionado neste trabalho, porém, que conta com um sistema de triagem de recicláveis e CDR, etapa esta não presente neste trabalho.

Por existirem custos redundantes entre os dois sistemas apresentados pelo autor, realizou-se a retirada dos valores repetidos e também dos referentes apenas às unidades de triagem de recicláveis e CDR, resultando em uma taxa para os custos variáveis e fixos de aproximadamente 19,01 R\$/t, em 2016.

É importante ressaltar que, como o OPEX está presente ao longo do projeto, este deve ser corrigido anualmente por índices de inflação, sendo o índice escolhido aqui o IPCA, com valor anual de 3,50%, valor próximo à meta atual (BCB, 2019)

4.4.3.3 Receitas

As principais receitas obtidas com o sistema de metanização são referentes aos dois produtos gerados, que são o biogás e o biossólido agrícola. O biogás poderá ser transformado em energia elétrica no próprio sistema de metanização, uma vez que se encontra presente dentro do sistema uma planta de geração elétrica por meio da queima do biogás.

Atualmente na região sudeste do país, tem-se uma tarifa média de energia no valor de 0,56 R\$/kWh segundo a ANEEL (2019), valor este que será adotado aqui para fins de conversão da geração elétrica por meio da queima de biogás em receita.

Com relação ao valor de venda do biossólido, tinha-se em 2011 um valor de 22,00 R\$/t, conforme Corrêa e Corrêa (2011), que será adotado neste para fins de conversão da venda do biossólido em receita.

É importante ressaltar que, como estas taxas estarão presente ao longo do projeto, deve-se corrigi-las anualmente por índices de inflação, sendo o índice escolhido aqui o IPCA, com valor anual de 3,50%, valor próximo à meta atual (BCB, 2019b).

5 RESULTADOS E DISCUÇÕES

5.1.1 MEMORIAL DE CÁLCULOS

5.1.1.1 Cálculo dos parâmetros para dimensionamento

5.1.1.1.1 Geração de FORSU

Considerando uma geração per capita de 0,94 kg_{RSU}/hab.dia, uma população de fim de plano de 11.413 habitantes e uma fração orgânica de 50% dos resíduos dos resíduos sólidos urbanos brasileiros, têm-se

$$\text{Geração de FORSU} = 0,94 * 11.413 * 0,50 = 5.364 \text{ kg FORSU/dia};$$

Desta maneira, a produção diária em massa da FORSU que será digerida pelo biorreator a se projetar é de 5.364 kg.

5.1.1.1.2 Volume de água para diluição do substrato

Como citado, para o preparo do substrato será necessário a diluição da FORSU com água. Considerando uma produção diária de 5.364 kg de FORSU à 25% de ST, para uma diluição de 25% de ST para 10% de ST, temos:

$$C_{ST} = PD_{FORSU} \cdot ST_i = 5.364 * 0,25 = 1.341 \text{ kgST/dia}$$

Onde:

C_{ST} – Carga de Sólidos Totais adicionada diariamente no biodigestor (kg/dia);

PD_{FORSU} – Produção diária de FORSU (kg/dia);

ST_i – Teor de ST da FORSU (%);

Desta maneira, a Carga de Sólidos Totais adicionada diariamente no biodigestor é de 1.341 kg de ST. Desta maneira, considerando que o substrato final tenha 10% de ST, a massa total de alimentação diária deve ser de

$$C_T = \frac{C_{ST}}{ST_f} = \frac{1.341}{0,10} = 13.410 \text{ kg Substrato /dia}$$

Onde:

C_T – Carga total de substrato (kg/dia);

C_{ST} – Carga de Sólidos Totais adicionada diariamente ao biodigestor (kg/dia);

$ST_{Substrato}$ – Teor de ST do substrato (%);

Sendo assim, como:

$$C_{\text{Água}} = C_t - C_{ST} = 13.410 - 1.341 = 12.069 \text{ kg Água/dia}$$

Onde:

$C_{\text{Água}}$ – Carga total de água adicionada diariamente ao biodigestor (kg/dia);

C_T – Carga total de substrato (kg/dia);

C_{ST} – Carga de Sólidos Totais adicionada diariamente ao biodigestor (kg/dia);

Ressalta-se que, inicialmente o substrato conta com 5.364 kg de FORSU à 25% de ST (1.341 kg de sólidos + 4.023 kg água), dessa forma:

$$C_{\text{Diluição}} = C_{\text{Água}} - C_{i\text{Água}} = 12.069 - 4.023 = 8.046 \text{ kg Água/dia}$$

Onde:

$C_{\text{Diluição}}$ – Carga de água adicionada diariamente para diluição do substrato (kg/dia);

$C_{\text{Água}}$ – Carga de água adicionada diariamente ao biodigestor (kg/dia);

$C_{i\text{Água}}$ – Carga de água inicial do substrato (kg/dia),

Desta forma, considerando densidade da água de 1000 kg/m³, será necessário diariamente uma vazão de 8,05 m³ de água para a diluição do substrato.

5.1.1.1.3 Vazão do substrato

Considerando as informações calculadas anteriormente, temos:

$$Q_{FORSU} = \frac{PD_{FORSU}}{\rho_{FORSU}} = \frac{5.364}{840} = 6,38 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Q_{FORSU} – Vazão de FORSU (m³/dia)

PD_{FORSU} – Produção diária de FORSU (kg/dia);

ρ_{FORSU} – Massa específica de FORSU (kg/m³).

Dessa forma, a vazão final é:

$$Q = Q_{FORSU} + Q_{\text{Água Diluição}} = 6,38 + 8,05 = 14,43 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Onde:

Q – Vazão do substrato em m³/dia;

Q_{FORSU} – Vazão da FORSU em m³/dia;

$Q_{\text{Água Diluição}}$ – Vazão da água de diluição em m³/dia.

Assim sendo, a vazão do substrato, isto é, a vazão de projeto (Q) será de 14,43 m³/dia. Ressalta-se que este valor é associado a vazão de final de plano.

5.1.1.1.4 Concentração de sólidos voláteis do substrato

Sendo a vazão de substrato calculada de 14,43 m³/dia contendo 5.364 kg de FORSU à 25 % de FORSU, e, considerando 90% SV/ST, obtêm-se:

$$C_{SV} = T_{SV/ST} * C_{ST} = 0,90 * (5.364 * 0,25) = 1.207 \text{ kg}_{SV}/\text{dia}$$

$$Conc_{.SV} = \frac{C_{STV}}{Q} = \frac{1.207}{14,43} = 83,6 \text{ kg}_{SV}/\text{m}^3$$

Onde:

$Conc_{.SV}$ – Concentração de sólidos voláteis no substrato em $\text{kg}_{SV}/\text{m}^3$;

$T_{SV/ST}$ – Teor de SV/ST do substrato;

C_{ST} – Carga de Sólidos Totais diária do biodigestor ($\text{kg}_{ST}/\text{dia}$);

C_{SV} – Carga de Sólidos Totais Voláteis diária do biodigestor $\text{kg}_{SV}/\text{dia}$;

Q – Vazão do substrato em m^3/dia ;

Assim sendo, a concentração de sólidos voláteis do substrato será de $83,6 \text{ kg}_{SV}/\text{m}^3$.

5.1.1.2 Parâmetros de dimensionamento

A Tabela 5-1 a seguir apresenta, em resumo, os parâmetros para o dimensionamento do biorreator:

Tabela 5-1: Principais parâmetros para o dimensionamento do biodigestor.

Parâmetro	Valor considerado
Produção mássica diária de FORSU	5.354 kg FORSU/dia
Teor Sólidos Totais da FORSU	25 %
Teor de Sólidos Voláteis Totais da FORSU e do Substrato	90%
Teor de Sólidos Totais do Substrato	10%
Carga diária de ST do Substrato	1.341 kg/dia
Carga diária de SVT do Substrato	1.206 kg/dia
Vazão de água para diluição	8,05 m^3/dia
Massa específica da FORSU	840 kg/m^3
Vazão do substrato	14,43 m^3/dia
Concentração de SVT do Substrato	83,6 kg/m^3

5.1.1.3 Dimensionamento do Tanque de Diluição e Alimentação

Conforme se verifica no item 4.3, o tanque de diluição e alimentação do presente projeto está conectado com o triturador da FORSU e possui um sistema de agitação, do tipo hidráulico.

Segundo Jacinto (2014), é indicado que o tanque de diluição e alimentação possua a capacidade para reter o equivalente a dois dias da quantidade de resíduo recebido e diluído, funcionando como um tanque de equalização. Diante dessa recomendação

e considerando a vazão diária de substrato de 14,43 m³/dia, tem-se que o tanque de diluição e alimentação deverá conter um volume de 28,86 m³, para fins práticos, será considerado 30 m³.

Além disso, considerando a utilização de um tanque de alimentação cilíndrico, foi definido um tanque com raio da base de 2 m e altura de projeto de 2,4m. Considerando-se ainda uma possível formação antecipada de biogás, pelo início da DA já no tanque, será considerado para construção um tanque com altura de 3 m, possibilitando um volume para ocupação pelo biogás formado. Dessa forma o tanque terá dimensões R = 2m, e H = 3m.

5.1.1.4 Volume do Biodigestor

Para dimensionamento do volume do biodigestor utilizou-se os parâmetros para dimensionamento COV e TRH, como apresentado no item 4.2.2.3. Para tal, buscou-se, em uso de planilha eletrônica os valores de COV entre 1 e 4 kg_{SV}/dia e de TRH mínimo entre 15 e 20 dias que retornassem o mesmo volume de biodigestor, considerando que:

$$COV = \frac{C \cdot Q}{V}$$

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Isto considerando a vazão do substrato (Q) igual a 14,43 m³/dia e a concentração de SV no substrato (C) igual a 83,6 kg_{SV}/m³. Desta maneira, a Tabela 5-2 apresenta os valores aproximados retornados:

Tabela 5-2: Parâmetros dimensionados.

Parâmetro	Valor considerado
Carga Orgânica Volátil (COV)	4,0 kg _{SV} /m ³ _{reator} .dia
Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)	21 dias
Volume do Reator	300 m³

Ressalta-se que o volume do reator foi projetado considerando o final de plano, entretanto, é necessário avaliar as alterações operacionais durante os 20 anos de projeto. A Tabela 5-3 a seguir apresenta a evolução, a cada cinco anos, dos principais parâmetros de projeto.

Tabela 5-3: Evolução temporal dos principais parâmetros de projeto.

Parâmetros	Evolução temporal				
	2020	2025	2030	2035	2040
População (hab)	10.241	10.734	11.089	11.304	11.413
Vazão do Sistema (m ³ /dia)	12,95	13,57	14,02	14,29	14,43
Carga SV (kg _{SVT} /dia)	1.083	1.135	1.173	1.195	1.207
COV (kg _{SVT} /m ³ reator.dia)	3,61	3,78	3,91	3,98	4,02
TRH (dias)	23,17	22,10	21,39	20,99	20,79

Nota-se, que para o volume dimensionado, espera-se manter entre as faixas de referência os valores de COV e TRH durante todos o período de projeto considerado.

Apesar de ser pouco convencional, Malinowsky (2016) relata que biodigestores utilizando FORSU como substrato podem atingir performance máxima de produção de biogás com COV's entre 5 e 10 kgSV.m⁻³ reator.d⁻¹, a depender das condições do substrato e de operação do sistema. Desta maneira, é possível avaliar a utilização de maiores cargas no digestor projetado, avaliando sua capacidade de funcionamento.

Para construção será considerado um digestor com formato cilíndrico. Definiu-se então a utilização de raio da base igual a 4,5 m, ou seja, 9 m de diâmetro. Sendo assim, temos:

$$V = \pi * R^2 * h$$

$$h = \frac{V}{\pi * R^2} = \frac{300}{3,14 * 4,5^2} = 4,72 \text{ m}$$

Onde:

V – Volume do Reator (m^3);

R – Raio da base do reator (m);

h – Altura de projeto reator (m)

Segundo De Souza e Schaeffer (2015), com base em estudo de modelagem computacional, fixaram uma proporção de tamanho de biorreatores anaeróbicos no qual a altura do tanque mantenha uma medida de 0,5 vezes seu diâmetro, isto é, a altura seja igual ao raio, seja qual for o volume fornecido. Desta maneira, o valor dimensionado segue a proporção recomendada pelos autores, na qual a altura é 0,52 vezes o diâmetro.

Considerando ainda, assim como no tanque de diluição, uma folga entre a coluna de substrato do reator e a tampa, visando a acumulação e coleta de biogás, definiu-se a altura total do reator (H) como 6 m. Desta forma, o volume máximo para acumulação de biogás é de cerca de 81 m^3 .

5.1.1.5 Produção de Biogás

Como citado no subitem 4.2.2.3 a vazão de biogás produzido é calculada através da taxa de produção de gás (GPR, do inglês *Gas Production Rate*). Para fins de cálculo, será utilizado o valor de referência descrito por Malinowsky (2016), na qual a média de produção de biogás em biodigestores utilizando FORSU é de 367 m^3 por tonelada de SVT do substrato, isto é, 0,367 m^3/kg_{SVT} , logo:

$$Q_{Biogás} = 0,367 * C_{STV}$$

Considerando que a carga de SV é variável ao longo do projeto, como apresentado pela Tabela 5-3, a seguir, a Figura 5-1 apresenta a evolução temporal da produção de biogás do sistema de metanização:

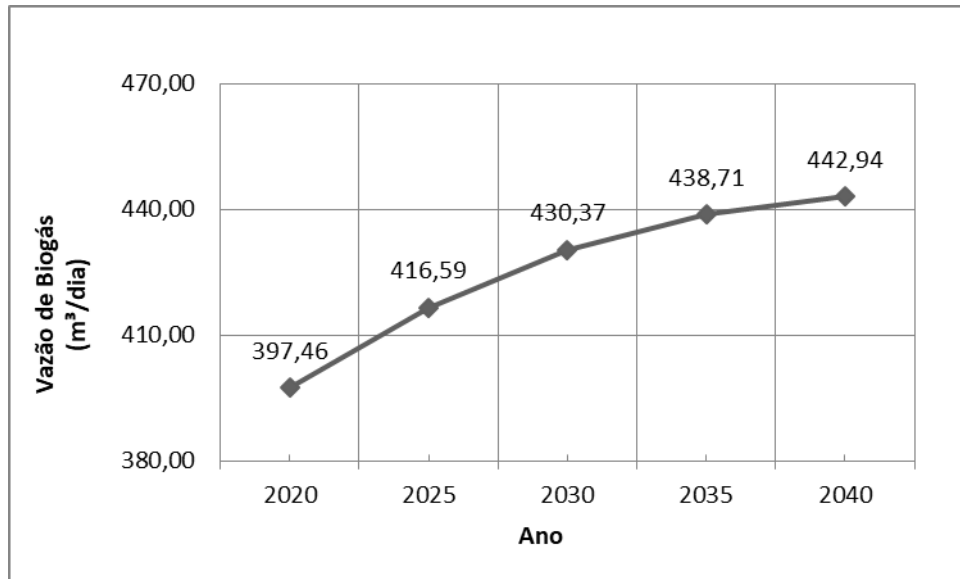


Figura 5-1: Evolução temporal da produção de biogás.

Segundo Palhares & Gebler (2014) reatores de alto rendimento como um CSTR possuem GPR na faixa de 1 a 1,4 $m^3 \cdot m^{-3}_{\text{reator}} \cdot d^{-1}$, para comparação, considerando o volume do biodigestor calculado anteriormente de 300 m^3 , temos:

$$Q_{\text{Biogás}} = GPR * V$$

$$Q_{\text{Biogás}} = 1 * 300 = 300 \text{ m}^3 / \text{dia}$$

$$Q_{\text{Biogás}} = 1,4 * 300 = 420 \text{ m}^3 / \text{dia}$$

Nota-se que o intervalo retorna valores similares ao calculado pela referência utilizada, que trabalhou, assim como este projeto, com FORSU.

5.1.1.6 Volume do Gasômetro

Conforme descrito anteriormente, é possível estabelecer uma relação entre o volume do biodigestor e o do gasômetro de 6:1, dessa forma, diante de um volume de 300 m^3 do biodigestor se tem um gasômetro com volume de 50 m^3 . O volume encontrado para o gasômetro é capaz de acumular o biogás produzido referente a cerca de 1 dia em situação de final de projeto, uma vez que funcionará em pressão de 9,08 atm, sendo que após acumular a carga máxima de biogás o excedente deverá ser direcionado para o *flare*.

5.1.1.7 Geração de Energia elétrica

Considerando que o gás chega a $6,5\text{kWh/m}^3$ (23.380kJ/m^3) de poder calorífico (DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008). Segundo os autores, esta transformação é feita através de geradores de energia, que se encontram no mercado com diferentes tecnologias de transformação.

Ressalta-se. que o processo de transformação de energia contém perdas, tornando-se necessário a escolha de equipamentos que forneçam o melhor custo benefício do sistema. Em média, considera-se uma eficiência de 40 % em geradores de energia elétrica com uso de biogás (PROENÇA, 2010; DEUBLEIN E STEINHAUSER, 2008). Assim sendo, considera-se:

$$E_{gerada} = 0,4 * P_{calorífico} * Q_{biogás}$$

Onde:

E_{gerada} – Energia gerada pelo sistema, em situação de final de plano (kWh/dia);

$P_{calorífico}$ – Poder calorífico do biogás (kWh/m^3);

$Q_{biogás}$ – Vazão de produção de biogás, em situação de final de plano (m^3/dia).

Desta forma, considerando a utilização de toda a produção de biogás no ano de 2020, 2025, 2030, 2035 e 2040, a Tabela 5-4 apresenta os resultados de energia diária e anual gerada.

Tabela 5-4: Geração de energia com o biogás produzido.

Ano	Vazão diária total de biogás (m^3/dia)	Energia diária gerada (MJ kWh)	Energia anual gerada (GJ MWh)
2020	397,46	3.717,0 1.033,4	1.356,7 377,2
2025	416,59	3.869,0 1.083,1	1.422,0 395,3
2030	430,37	4.024,8 1119,0	1.469,0 408,4
2035	438,71	4.102,8 1.140,6	1.497,5 416,3
2040	442,94	4.142,4 1151,6	1.512,0 420,3

5.1.2 FLUXOGRAMA E BALANÇO DE MASSA DO SISTEMA DE METANIZAÇÃO

Neste momento do projeto é apresentado o fluxograma do balanço de massa pelo sistema de metanização, para isso, faz-se necessários algumas considerações. Ressalta-se que o fluxo será apresentado entre a preparação do substrato no tanque de alimentação e as saídas dos subprodutos do biodigestor, que serão divididas em biogás, efluente e lodo (biossólido).

Proença (2010), admite transformação de 85% da demanda química de oxigênio (DQO) em metano, o que corresponde a cerca de 75% dos sólidos voláteis. Segundo UFPR (2018) a conversão da biomassa em metano pelos micro-organismos, pode variar de 60 a 95%. Dessa forma, foi admitido, para fins de cálculo, um fator de transformação da massa dos sólidos voláteis em biogás de 80%.

Para o efluente, considerando o processo devidamente estabilizado, será considerada uma eficiência de tratamento de 80% de ST e 85% SV, em acordo com o trabalho de Reis (2012).

Desta maneira, a descrição do fluxo de massa do sistema é ilustrada pela Figura 5-2, partindo do valor de ST inicial do substrato, e sua separação em 90% SV/ST e 10% de SF/ST.

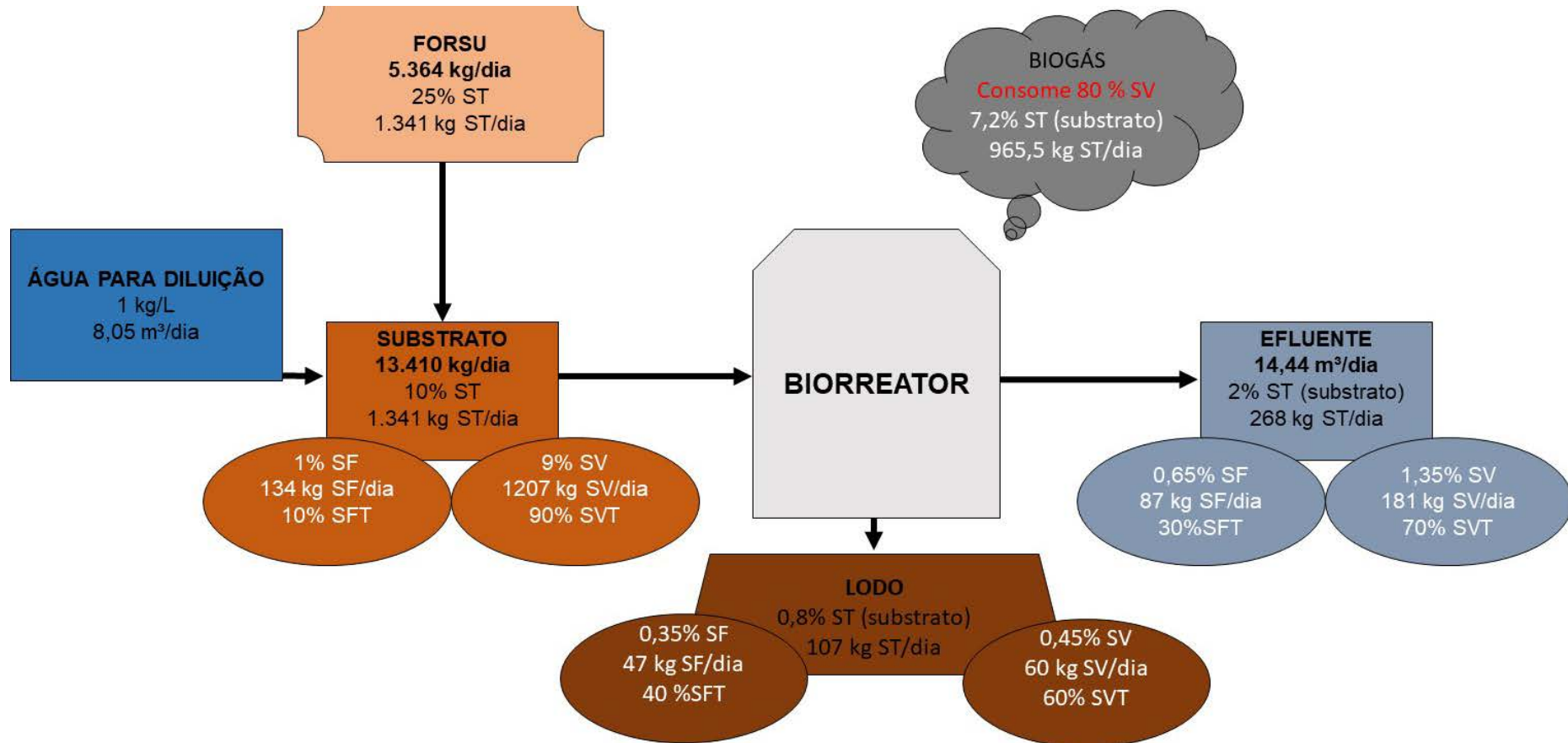


Figura 5-2: Fluxo de massa do sistema de metanização.

É necessário pontuar que a fração descrita como (LODO) representa os sólidos que estão ficando retidos no reator, ao fim do fluxo. Desta maneira, e uma retenção média 0,8% ST (107kg) por dia, no reator. Diante disso, espera-se um crescimento geral dos ST do substrato presente no reator.

Considerando, para fins de cálculo, o crescimento de ST constante de 0,8% ST, estima-se um aumento semanal do ST do substrato de 5,6%. Para manutenção do funcionamento do biorreator dentro do esperado, será considerando para o sistema uma remoção de lodo semanal. Para fins de cálculo, será considerado o teor de ST de 15% no lodo de remoção.

Desta maneira, para a remoção dos 750 kg de sólidos ($7 \cdot 107$ kg/dia) retidos semanalmente, deve-se remover 5.000 kg de lodo à 15%. Considerando a densidade do lodo anaeróbio de 1.065 m³/ton (VON SPERLING, 2005), deverá ser removido do biodigestor 4,7 m³ de lodo semanalmente.

Para o lodo, será previsto um separador sólido líquido, elevando a concentração de sólidos para uso como bio-sólido. O teor de ST de bio-sólido está em torno de 20%, e tinha valor de mercado, no ano de 2011, de 22 R\$/ton (FERNANDES E SILVA, 2000; CORRÊA E CORRÊA 2011). Considerando a remoção de 5.000 kg de lodo por semana à 15%, estima-se a produção de bio-sólido (20% ST) de 3.750 kg/semana.

5.1.3 DESCRIÇÃO DO BIOREATOR ANAERÓBIO

A Tabela 5-5 a seguir apresenta todas as informações de projeto e operação do biorreator:

Tabela 5-5: Parâmetros operacionais e de projeto do biorreator.

Parâmetro	
Definido	
Tipo de Biorreator	Modelo CSTR
Regime de Alimentação	Contínuo
Umidade	10% ST (Úmido)
Número de estágios	1 estágio
Tipo de digestão	Monodigestão
Temperatura	Mesofílico
Substrato	FORSU
Pré-Tratamento	Trituração da FORSU (Físico)
Material	Concreto com revestimento de fibra de vidro
Forma	Cilíndrica
Dimensionado	
Volume	300 m ³
Raio	4,5 m
Diâmetro	9 m
Altura de projeto	4,72 m
Altura total do reator	6 m
Volume de acumulação e colete de biogás	81 m ³

5.1.4 PLANTAS E DESENHOS

As plantas e desenhos estão disponível no ANEXO II – Plantas esquemáticas do sistema de tratamento da FORSU.

5.1.5 MANUAL DE OPERAÇÃO

5.1.5.1 Recomendações Construtivas e de Instalação

Para a implantação de um sistema de metanização como o proposto neste projeto deve-se atender aos requisitos técnicos legais perante a legislação Municipal, Estadual e Federal. Para tal, é necessário a obtenção das licenças necessárias junto aos órgãos ambiental e de conselho de classe necessários. Desta maneira,

recomenda-se a contratação de uma equipe técnica capacitada para que as condições e características específicas do projeto sejam consideradas.

Deve-se avaliar a presença de lençol freático ou demais fontes hídricas na área de implantação do sistema. Quaisquer lançamentos de efluente devem cumprir o estabelecido pelas legislações Municipais, Estaduais e Federais, para que a instalação e operação do sistema atendam as condições específicas de cada região.

Para a determinação do local de instalação do Biodigestor, o responsável técnico da obra deverá considerar os seguintes aspectos:

- Natureza do solo;
- Presença de lençol freático;
- Grau de permeabilidade do solo.

Caso opte-se pela instalação do reator em local aterrado, recomenda-se fazer um levantamento das proximidades, verificando instalações, hidráulicas, elétricas ou de gás, para evitar acidentes por rompimento destas na escavação. A atividade de escavação deverá ser projetada e acompanhada pelo responsável técnico da obra. Além disso, neste caso, a base para assentamento do equipamento deve ser regular e estar corretamente nivelada para que o Biodigestor esteja bem posicionado e não fique inclinado, garantindo assim uma correta operação. Em caso de construção do reator no local de operação, o nivelamento e assentamento deve ser executado de forma cautelosa, considerando as instruções aqui estabelecidas.

5.1.5.2 Partida do sistema

Para inoculação do sistema, recomenda-se o preenchimento do reator, em batelada, antes do início da operação. Torres (1992) descreve um esgoto sintético, composto por 50% de proteínas (extrato de carne), 40% de carboidratos (sacarose, amido e celulose) e 10 % de lipídios (óleo de soja), contendo ainda sais minerais. Outra opção recomendada é a obtenção de lodo de tratamento de esgoto, para a utilização na inoculação.

Durante o período de partida do sistema faz-se necessário manter baixas as cargas orgânicas aplicadas (próximas a $1,0 \text{ kgSV/m}^3\text{.d}$), com o objetivo de garantir a adaptação metabólica da biota anaeróbia ao substrato utilizado. Após o processo de partida, as cargas orgânicas aplicadas devem evoluir progressivamente, até atingir aos valores de projeto, a fim de evitar choques de carga (FERREIRA, 2015). No caso de uma situação idêntica a este projeto, para a manutenção da COV próxima a $1,0 \text{ kgSV/m}^3\text{.d}$, a vazão deverá ser mantida entre 5 e 6 $\text{m}^3\text{/dia}$. Para avaliação da estabilidade, recomenda-se avaliar o nível de tratamento e a eficiência de produção de biogás.

5.1.5.3 Operação e Manutenção

Faz-se necessária máxima atenção e eficiência nas etapas de segregação do RSU e trituração e diluição da FORSU. É importante que o substrato esteja livre de impurezas como metal, areia, pedras e vidros, que desgastam o reator. Já os materiais leves como plástico ou materiais lenhosos podem provocar o entupimento do sistema ou a formação de espuma (camada grossa flutuante) (PROBIOGÁS, 2015).

Inspeções de bombas hidráulicas e dutos que conduzem substrato e digestato devem ser efetuadas rotineiramente para evitar entupimento e sobre pressão. Alguns líquidos podem formar precipitados ou depósitos nas paredes das tubulações (Figura 11), restringindo a vazão, causando aumento da pressão, sobrecarga de trabalho em bombas, vazamentos e até queda na produtividade de biogás (AMARAL et al., 2019). Para evitar paralizações, recomenda-se que toda elevatório opere com duas bombas, uma em operação, e outra, para imediata substituição em caso de manutenção ou troca. Nesta situação é importante que as bombas trabalhem em regime alternado, para quem não passem longos períodos sem funcionamento, o que danifica o equipamento (PORTO, 2006).

O uso de barreiras físicas, canaletas e tanques de armazenamento dos líquidos deve ser considerado em todas as áreas de risco para reter eventuais vazamentos (AMARAL et al., 2019).

Em vistas a manutenção da estabilidade ambiental do reator de metanização deve-se monitorar os principais parâmetros de controle operacional de reatores anaeróbios: vazão, teor de ST, temperatura, carga orgânica volumétrica e tempo de retenção hidráulica. Além disso, faz-se necessário monitorar outras condições, como pH, alcalinidade, eficiência de conversão de matéria orgânica, e, ocasionalmente avaliar toda composição química do substrato, do lodo e do efluente do sistema.

Ainda mais, deve-se monitorar a produção de biogás do sistema, visando identificar as causas de eventuais variações, além de, fornecer informações quanto ao balanço energético do sistema. Dessa forma, faz necessário avaliar a composição química do biogás através de medidores automáticos, visando na operação elevar as concentrações CH_4 e diminuir as concentrações de CO_2 e gás sulfídrico H_2S .

Será previsto utilização de válvulas tipo borboleta como registro e utilização de tubos com diâmetro nominal (DN) de até 50. Não devem ser usadas válvulas de ferro fundido cinzento pela possibilidade de ataque químico pelo H_2S . Os registros devem ser instalados a montante e a jusante das válvulas corta-chamas, para que as atividades de manutenção sejam realizadas de forma segura e para que se evite a entrada de ar na tubulação de biogás. (AMARAL et al., 2019).

Em caso da utilização deste sistema em temperaturas muito baixa e/ou uso intermitente, pode ocorrer queda de eficiência do sistema em função da menor atividade na digestão aneróbia. Nessas situações recomenda-se avaliar a possibilidade de instalação de um sistema de aquecimento. Interrupções frequentes também podem causar a diminuição da DA.

5.1.5.4 Segurança e Meio Ambiente

Além dos riscos ambientais, geralmente associado a projetos de saneamento, existe o risco ocupacional biológico. Portanto, sugere-se atentar aos requisitos contidos nas Normas Regulamentadoras (NR) sobre Segurança e Saúde no Trabalho (SST) – com destaque para a NR 15 (atividades ou operações insalubres) (Brasil, 2015).

Uso de equipamentos de proteção individual (ex.: luvas, calçado fechado e óculo de proteção) devem ocorrer durante todas as atividades como a manipulação de amostras, purificação do biogás, uso e tratamento do efluente e do lodo, etc.

Deve-se, ainda, realizar monitoramentos periódicos nos dutos e reservatórios para avaliar se existem vazamentos e gás no reator. Estas ações devem ser realizadas com extremo cuidado e em uso de equipamentos de segurança. Isto se deve pela mistura gasosa que compõe o biogás, que apresenta propriedades asfixiantes (sufocamento). Além disso, outros aspectos como corrosividade e toxicidade do H_2S , toxicidade da amônia (NH_3), além da inflamabilidade do CH_4 e hidrogênio (H_2) também devem ser considerados (AMARAL et al., 2019).

É necessário o uso de manômetros para monitoramento da pressão do gás verificando-se a necessidade de uso de válvulas e/ou registros. Além disso, recomenda-se a utilização de sistemas corta-chamas nas áreas de risco, com isolamento da área da câmara de armazenamento de gás (AMARAL et al., 2019).

A fim de se evitar faíscas e descargas elétricas que podem causar incêndios e explosões, deve-se ter preocupações como o aterramento dos dutos e com os equipamentos elétricos. Pelo mesmo motivo, possíveis fontes de ignição devem ser avaliadas e evitadas. Uso de telefones celulares, fumar ou qualquer outra fonte de centelha ou chama não devem ser permitidas nas áreas de risco. Além disso, a avaliação da utilização de para-raios também deve ser contemplada (AMARAL et al., 2019).

A instalação de queimadores para destinação do excedente do gás é uma ferramenta de segurança importante, mas que também necessita de alguns cuidados. A norma NBR ABNT 12.209 de 2011 indica que os queimadores devem ser instalados de forma que suas chamas, gases e componentes quentes não ofereçam risco. Em todos os casos, o uso de anteparos contravento e protetores contra chuva é recomendado para melhoria do acendimento e do monitoramento do queimador e chama-piloto, quando houver.

Outro cuidado básico para prevenção de acidentes, é a delimitação das áreas onde estão os biodigestores, os reservatórios e outras instalações por meio de cercas e avisos de orientação.

5.1.5.5 Recomendações Gerais

Questões como o controle de vegetação no entorno das instalações e o controle de roedores (que são grandes responsáveis por danificar membranas plásticas e cabos elétricos) também podem evitar problemas simples que impactam a operação de biodigestores ou planta de biogás (AMARAL et al, 2019).

5.2 ANÁLISE ECONÔMICA

5.2.1 CAPEX E OPEX

Com relação ao CAPEX, fazendo o uso da taxa de R\$ 683,00 por tonelada de resíduo tratado, obteve-se um valor de R\$ 1.337.218 com referência no ano de 2016, sendo necessária a correção do valor com base no índice de inflação (IPCA) acumulado entre o início do ano de 2016 e o início de 2020 (data final da implantação do projeto). Dessa forma, aplicando o índice de inflação aqui considerado, de 3,5% ao ano, tem-se um valor de CAPEX atualizado para o final do ano de 2019 de R\$ 1.482.597.

Aplicando os custos tratados no item 4.4.3.2 – “OPEX” e realizando a correção monetária pela inflação, obteve-se os seguintes valores de OPEX anuais ao longo do tempo de projeto:

A Tabela 5-6 abaixo apresenta os custos totais anuais, de forma resumida:

Tabela 5-6: Custos operacionais com recursos humanos e valores fixos e variáveis ao longo do tempo de projeto

Ano	OPEX (R\$)
2020	-85.178,37
2021	-88.159,61
2022	-91.245,20
2023	-94.438,78
2024	-97.744,14
2025	-103.355,23
2026	-106.972,67
2027	-110.716,71
2028	-114.591,80
2029	-118.602,51
2030	-124.626,60
2031	-128.988,53
2032	-133.503,12
2033	-138.175,73
2034	-143.011,88
2035	-149.364,55
2036	-154.592,31
2037	-160.003,04
2038	-165.603,15
2039	-171.399,26
2040	-178.209,46

Fonte: Autor.

5.2.2 Receita

Com relação à receita, foi necessário inicialmente realizar a correção inflacionária dos valores de venda de energia e biossólidos que constam no item 4.4.3.3 – “Receitas”, utilizando para isso o IPCA de 3,5% ao ano, uma vez que os valores de receita variam durante todo o tempo de projeto.

O valor de venda de biossólido presente neste trabalho foi determinado considerando um valor em 2011, diante disso, foi necessária sua correção até o ano de 2020, que é o ano de início da operação do projeto, resultando em um valor de venda de 29,98 R\$/t.

A Tabela 5-7 abaixo apresenta a receita total por ano, de forma resumida:

Tabela 5-7: Receita total anual considerando o potencial energético do Biogás e a venda do Biosólido.

Ano	Receita Total (R\$)
2020	217.086,92
2021	224.684,96
2022	232.548,93
2023	240.688,14
2024	249.112,23
2025	269.907,89
2026	279.354,66
2027	289.132,08
2028	299.251,70
2029	309.725,51
2030	330.894,29
2031	342.475,59
2032	354.462,23
2033	366.868,41
2034	379.708,81
2035	400.427,85
2036	414.442,83
2037	428.948,33
2038	443.961,52
2039	459.500,17
2040	480.056,04

Fonte: Autor

Uma tabela com o maior detalhamento com relação aos lucros se encontra em anexo para melhor visualização dos itens considerados para o cálculo da receita total, assim como a receita proveniente exclusivamente da venda da energia e do biossólido.

5.2.3 Fluxo de caixa

Conforme exposto no item 4.4, o fluxo de caixa considera as entradas e saídas de dinheiro em um projeto. Diante disso, observando os resultados obtidos para o CAPEX, OPEX e receitas nos itens anteriores, obteve-se o seguinte fluxo de caixa, apresentado na Tabela 5-8.

Tabela 5-8: Fluxo de caixa do sistema de metanização proposto.

Ano	Receita Total (R\$)	Despesas Totais (R\$)	Lucro/Fluxo de Caixa (R\$)
2020	217.086,92	-85.178,37	131.908,55
2021	224.684,96	-88.159,61	136.525,35
2022	232.548,93	-91.245,20	141.303,73
2023	240.688,14	-94.438,78	146.249,36
2024	249.112,23	-97.744,14	151.368,09
2025	269.907,89	-103.355,23	166.552,65
2026	279.354,66	-106.972,67	172.382,00
2027	289.132,08	-110.716,71	178.415,37
2028	299.251,70	-114.591,80	184.659,90
2029	309.725,51	-118.602,51	191.123,00
2030	330.894,29	-124.626,60	206.267,69
2031	342.475,59	-128.988,53	213.487,06
2032	354.462,23	-133.503,12	220.959,11
2033	366.868,41	-138.175,73	228.692,68
2034	379.708,81	-143.011,88	236.696,92
2035	400.427,85	-149.364,55	251.063,30
2036	414.442,83	-154.592,31	259.850,52
2037	428.948,33	-160.003,04	268.945,28
2038	443.961,52	-165.603,15	278.358,37
2039	459.500,17	-171.399,26	288.100,91
2040	480.056,04	-178.209,46	301.846,59

Fonte: Autor

5.2.4 Payback Descontado

Conforme se verifica no item 4.4.1, este mostrará em que momento o projeto se paga, com a consideração do valor no tempo por meio do desconto do valor do juros (Taxa Selic – 5% a.a.), formando o chamado “Valor Presente (VP)”, retirando este valor do CAPEX. Desta forma, a aplicação do cálculo retornou os valores de Payback Descontado apresentados a seguir, na Tabela 5-9:

Tabela 5-9: Valores calculados do Payback Descontado.

Ano	Fluxo de Caixa (R\$)	Valor presente (R\$)	Payback Descontado (R\$)
2019	-	-	-1482.597,81
2020	131.908,55	125.627,19	-1356.970,62
2021	136.525,35	123.832,51	-1233.138,11
2022	141.303,73	122.063,48	-1111.074,63
2023	146.249,36	120.319,71	-990.754,92
2024	151.368,09	118.600,86	-872.154,06
2025	166.552,65	124.284,15	-747.869,91
2026	172.382,00	122.508,67	-625.361,24
2027	178.415,37	120.758,54	-504.602,70
2028	184.659,90	119.033,42	-385.569,28
2029	191.123,00	117.332,94	-268.236,34
2030	206.267,69	120.600,45	-147.635,89
2031	213.487,06	118.877,58	-28.758,30
2032	220.959,11	117.179,33	88.421,03
2033	228.692,68	115.505,34	203.926,37
2034	236.696,92	113.855,27	317.781,64
2035	251.063,30	115.014,99	432.796,63
2036	259.850,52	113.371,92	546.168,55
2037	268.945,28	111.752,32	657.920,87
2038	278.358,37	110.155,86	768.076,73
2039	288.100,91	108.582,20	876.658,93
2040	301.846,59	108.345,53	985.004,46

Fonte: Autor

Como é possível visualizar, o Payback Descontado é de 12 anos, com o projeto se pagando e passando a gerar lucro no ano de 2032.

5.2.5 Valor Presente Líquido (VPL)

Para o cálculo do VPL, utilizou-se a metodologia exposta no item 4.4.2, trazendo os valores do fluxo de caixa ao longo do projeto para a data que foi realizado o investimento, qual seja, 2019. Utilizou-se como taxa de juros a Taxa Selic, com valor de 5% a.a.

O valor obtido para o VPL foi de R\$ 985.004,46, ou seja, maior do que zero, indicando que o projeto seria viável e resultaria em lucro para o investidor.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho foram avaliadas e apresentadas as condições técnicas e econômicas para utilização de um digestor anaeróbio do tipo CSTR para a metanização da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos de um pequeno município.

Observou-se na literatura os principais parâmetros de projeto e operação de reatores anaeróbios, e definiu-se para dimensionamento um Reator com Tanque Agitado Continuamente com regime de alimentação contínua, um estágio, monodigestão de FORSU com pré-tratamento de trituração, operação úmida (10 % ST), faixa de temperatura mesofílica, construído com material de alvenaria (concreto) revestido com fibra de vidro agitado pelo método hidráulico.

O reator considerado foi então projetado, possuindo um volume útil de 300 m³ e possibilitou, segundo os cálculos uma produção em fim de projeto de 442,94 m³ de biogás por dia e 3.750 kg de bio sólido por semana.

Considerando então a receita possibilitada pela geração de energia elétrica proveniente do biogás e a venda do bio sólido para uso agrícola e também os custos de CAPEX e OPEX para implantação do sistema com funcionamento de 20 anos, conclui-se que este projeto é viável economicamente para implantação. Possibilitando, inclusive a geração de lucros, além dos ganhos socioambientais atrelados pelo gerenciamento do resíduo e geração de emprego e renda.

Recomenda-se ainda, a avaliação deste projeto para outros cenários, como grandes empresas e restaurantes, que geram altos valores de resíduos orgânicos. Quanto a utilização do biogás, recomenda-se a avaliação do seu uso para outros fins, como a queima direta em fornos, uso no qual o rendimento é maior. Outra possível fonte de renda é a utilização do bio sólido proveniente do efluente. Opções que podem trazer ainda mais valor econômico agregado ao sistema proposto.

7 ANEXOS

ANEXO I - Tabelas detalhadas da receita total anual em razão da geração de energia e venda de bio sólido.

Tabela 7-1: Receita anual total com a geração de energia e venda do bio sólido – Parte 1

Ano	IPCA (%)	Geração de energia (MWh)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Receita da geração de energia (R\$)
2020	1,00	377,19	0,56	211.223,89
2021	1,04	377,19	0,58	218.616,73
2022	1,07	377,19	0,60	226.268,32
2023	1,11	377,19	0,62	234.187,71
2024	1,15	377,19	0,64	242.384,28
2025	1,19	395,34	0,67	262.944,46
2026	1,23	395,34	0,69	272.147,51
2027	1,27	395,34	0,71	281.672,68
2028	1,32	395,34	0,74	291.531,22
2029	1,36	395,34	0,76	301.734,81
2030	1,41	408,42	0,79	322.623,92
2031	1,46	408,42	0,82	333.915,76
2032	1,51	408,42	0,85	345.602,81
2033	1,56	408,42	0,88	357.698,90
2034	1,62	408,42	0,91	370.218,37
2035	1,68	416,34	0,94	390.605,25
2036	1,73	416,34	0,97	404.276,43
2037	1,79	416,34	1,01	418.426,11
2038	1,86	416,34	1,04	433.071,02
2039	1,92	416,34	1,08	448.228,51
2040	1,99	420,35	1,11	468.389,87

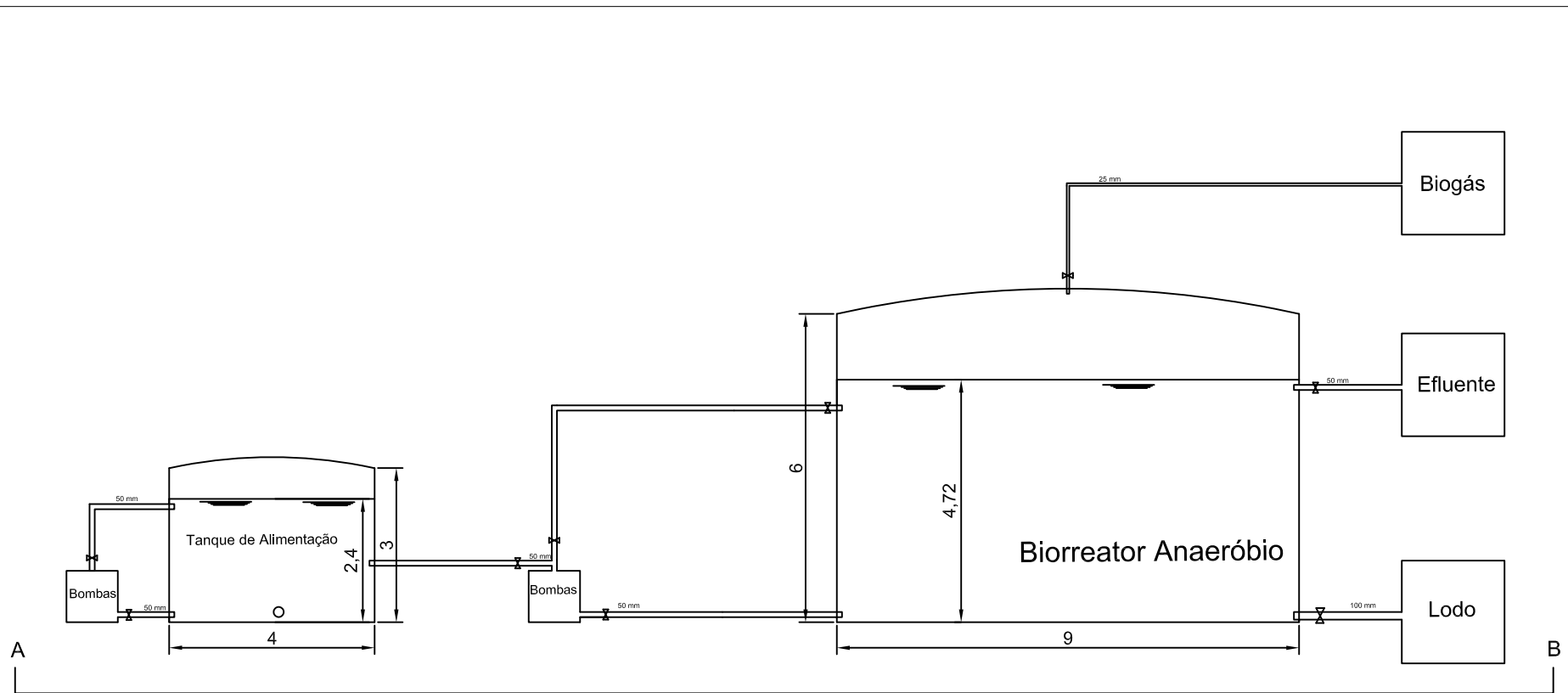
Fonte: Autor

Tabela 7-2: Receita anual total com a geração de energia e venda do bio sólido – Parte 2

Geração de bio sólido (t)	Valor do bio sólido (R\$/t)	Receita da geração de bio sólido (R\$)	Receita Total (R\$)
195,54	29,98	5.863,02	217.086,92
195,54	31,03	6.068,23	224.684,96
195,54	32,12	6.280,61	232.548,93
195,54	33,24	6.500,44	240.688,14
195,54	34,41	6.727,95	249.112,23
195,54	35,61	6.963,43	269.907,89
195,54	36,86	7.207,15	279.354,66
195,54	38,15	7.459,40	289.132,08
195,54	39,48	7.720,48	299.251,70
195,54	40,86	7.990,70	309.725,51
195,54	42,30	8.270,37	330.894,29
195,54	43,78	8.559,83	342.475,59
195,54	45,31	8.859,43	354.462,23
195,54	46,89	9.169,51	366.868,41
195,54	48,53	9.490,44	379.708,81
195,54	50,23	9.822,61	400.427,85
195,54	51,99	10.166,40	414.442,83
195,54	53,81	10.522,22	428.948,33
195,54	55,69	10.890,50	443.961,52
195,54	57,64	11.271,67	459.500,17
195,54	59,66	11.666,17	480.056,04

Fonte: Autor

ANEXO II – Plantas esquemáticas do sistema de tratamento da FORSU.



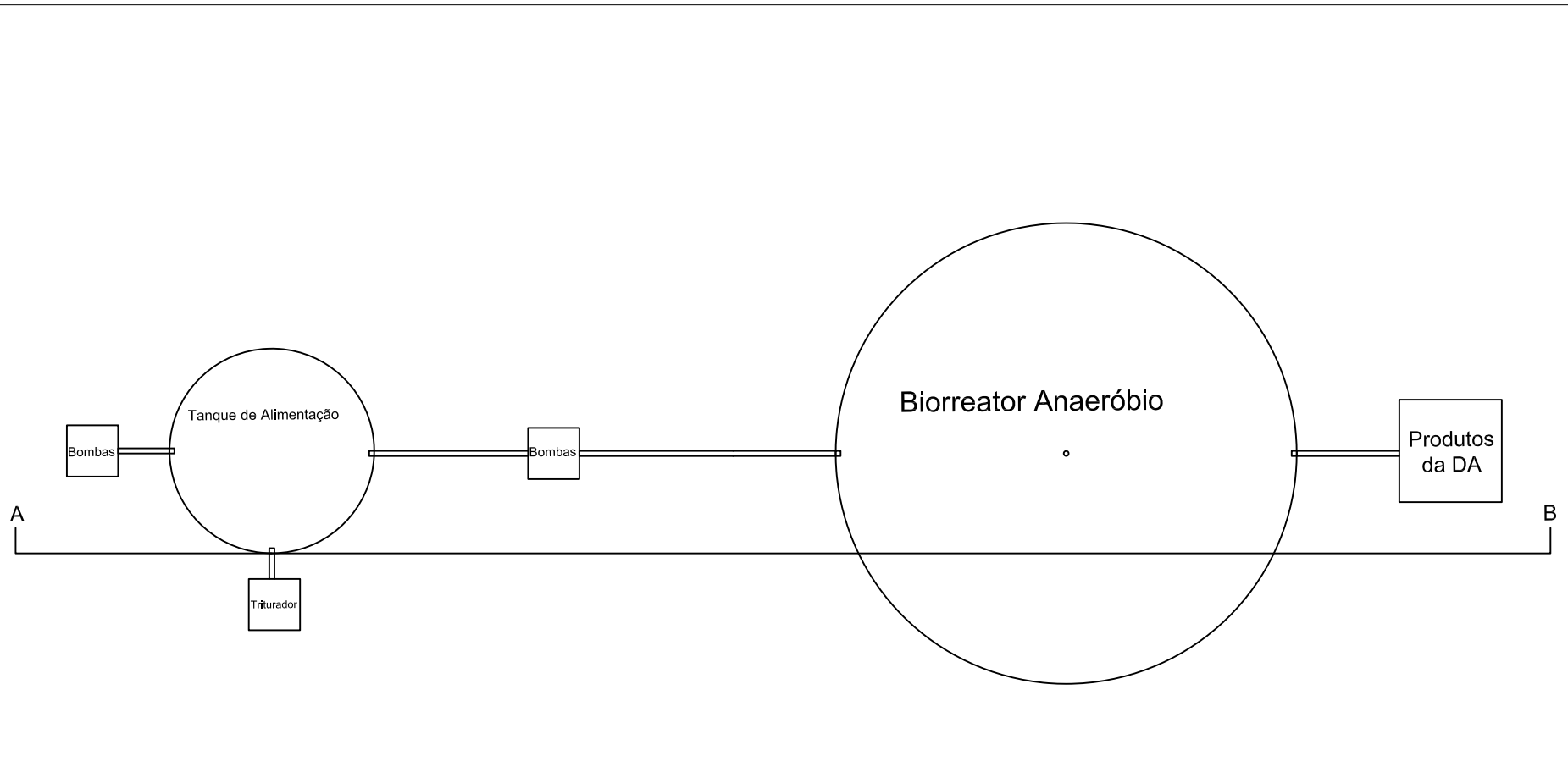
Título do desenho: Perfil longitudinal do sistema de metanização (Corte AB)

Título do projeto: Projeto Tecnológico de um Reator de Metanização de Resíduos Orgânicos

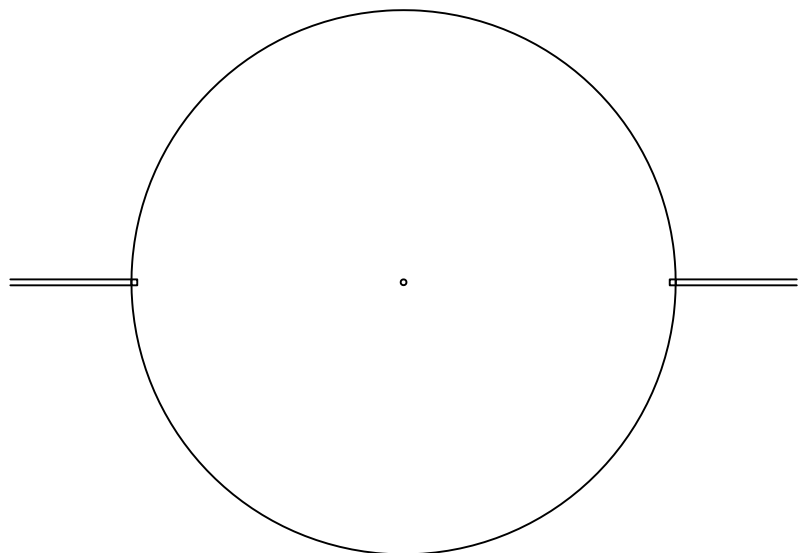
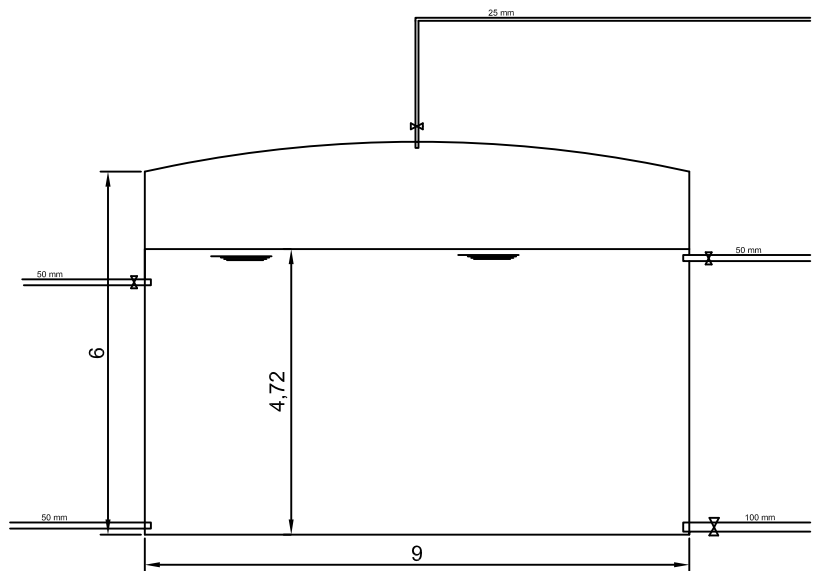
Autores do projeto:
Caio Rebuli de Oliveira / Eduardo Silva de Paula

Escala do desenho:
1:125

Data:
06 de dezembro de 2019



Título do desenho: Vista superior do sistema de metanização
Título do projeto: Projeto Tecnológico de um Reator de Metanização de Resíduos Orgânicos
Autores do projeto: Caio Rebuli de Oliveira / Eduardo Silva de Paula
Escala do desenho: 1:125
Data: 06 de dezembro de 2019



Título do desenho: Biorreator Anaeróbio em detalhe

Título do projeto: Projeto Tecnológico de um Reator de Metanização de Resíduos Orgânicos

Autores do projeto:
Caio Rebuli de Oliveira / Eduardo Silva de Paula

Escala do desenho:
1:125

Data:
06 de dezembro de 2019

8 REFERÊNCIAS

ABBASSI-GUENDOUZ, A. et al. Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. **Bioresource Technology**, v. 111, p. 55–61, 2012.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos No Brasil**. Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2014.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos No Brasil**. Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2017.

AMARAL, A.C. et al. **Os Biodigestores**. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. EMBRAPA, 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) – **Tarifas**. Disponível em “<https://www.aneel.gov.br/>”.

ASSEF, Roberto. **Guia prático de administração financeira: pequenas e médias empresas**. 2 ed. São Paulo: Campus, 1999.

ASSOCIAÇÃO. BRASILEIRA. DE NORMAS. TÉCNICAS **ABNT NBR 12209:2011: Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário**. 53 páginas. Rio de Janeiro 2011.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BCB. **Metas para a inflação**. 2019. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/metainflacao>>. Acesso em: 04 dez. 2019.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BCB. Taxa Selic. 2019b. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>>. Acesso em: 04 dez. 2019b.

BARCELOS, B. R. DE. **Avaliação De Diferentes Inóculos Na Digestão Anaeróbia Da Fração Orgânica De Resíduos Sólidos Domésticos.** p. 89, 2009.

BEL, Germà; MUR, Melania. Intermunicipal cooperation, privatization and waste management costs: Evidence from rural municipalities. **Waste Management**, 2009, 29.10: 2772-2778.

BRASIL, Ministério do Trabalho. **Normas Regulamentadoras.** Brasília, DF: 2015. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatiza-cao/normas-regulamentadoras>.

BRASIL. **Lei Nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007.** Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Publicado no DOU de 08/01/2007.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Publicado no DOU de 03/08/2010

BRASIL. Versão Preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2011.

BROWNE, J. D.; MURPHY, J. D. Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. **Appl. Energy**, v. 104, p. 170-177, 2013.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de Esgoto Sanitário por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Sol.** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CAMPUZANO, R., SIMÓN, G. Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: a review. **Waste Manage.** v.54, pag 3–12. Maio de 2016.

CARNEIRO, D.R.C. **Viabilidade Técnica e Económica de uma Unidade Centralizada de Co-Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, 2009.

CASSINI S. T . **Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás**. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico; Rede Cooperativa de Pesquisas (PROSAB), 2003.

CASSINI, S. T. ; COELHO, S. T. ; PECORA, V. Biogás- Biocombustíveis ANP. n. January, 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: UFMG, 246 p., 2007.

CHIUMENTI, A.; DA BORSO, F.; LIMINA, S. Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: Efficiency and comparison with wet fermentation. **Waste Management**, v. 71, p. 704–710, 1 jan. 2018.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do Uso do Biogás as Bovinocultura e Suvinocultura para Geração de Energia Elétrica e Irrigação em Propriedades Rurais**. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Sistemas Agroindustriais. Paraná, 2006.

COLTURATO, L. F. de D. B. et al. **O estado da arte da tecnologia de metanização seca**. Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2015.

CORRÊA, R.S.; CORRÊA, A.S.. Valoração de biossólidos como fertilizantes e condicionadores de solos. **SANARE**, v. 16, n. 16, p. 49-56, 2001.

DE SOUZA, José; SCHAEFFER, Lirio. Construção de plantas de biogás dimensionamento de biorreatores. **Revista Espacios**. V. 36, pg 11. 2015.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada** disponível na World Wide Web. 2002.

DENNEHY, C. et al. Stochastic modelling of the economic viability of on-farm co-digestion of pig manure and food waste in Ireland. **Applied Energy**, [s.l.], v. 205, p.1528-1537, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.101>.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. 2^o ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. p. 532, 2011.

FARIA, Ricardo Coelho et al. Descentralização ou Regionalização? Uma Avaliação de Performance do Setor de Saneamento. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 38, n. 1, p.120-129, jan-mar. 2007.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de bio sólidos**. 1^a ed. Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2010.

FERREIRA, B. O. Universidade Federal De Minas Gerais Programa De Pós-Graduação Em Saneamento, Meio Ambiente E Recursos Hídricos Avaliação De Um Sistema De Metanização De Resíduos Alimentares Com Vistas Ao Aproveitamento Energético Do Biogás. 2015.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. **Guia Prático do Biogás**: Geração e Utilização. Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Gülzow, Alemanha. 2010.

GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SEAMA). **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo**. 2019. Disponível em: <<https://seama.es.gov.br/plano-estadual-de-residuos-solidos>>. Acesso em: 02 set. 2019.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the**

Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.

INTERNATIONAL BANK FOR RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT (BANCO MUNDIAL). **What Waste 2.0 – A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Urban Development Series. Washington DC. 2018.

JACINTO, S.A. **Sustentabilidade urbana: Análise de viabilidade da implementação de um digestor anaeróbio de Resíduos Orgânicos na freguesia dos Olivais, Lisboa**. Dissertação e Mestrado. Lisboa. 2014.

JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos**, 6. Edição, Rio de Janeiro: ABES, 2011.

JUNQUEIRA, SLCD. **Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado**. Universidade do Rio Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

KIGOZI R. et al. **Sizing of an Anaerobic Biodigester for the Organic Fraction of Municipal Solid Waste**. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II. San Francisco, USA Outubro, 2014.

KOMILIS, D; BARRENA, B.; GRANDO, R.L.; VOGIATZI, V.; SÁNCHEZ, A. A state of the art literature review on anaerobic digestion of food waste: influential operating parameters on methane yield. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology** v. 16, 347–360. 2017.

KOSSMANN, W. et al., **Biogas Digest Volume I: Biogas Basics**, Eschborn, 1997.

LEI, Z. *et al.* Recent Progress on Dry Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes: Achievements and Challenges. **Current Organic Chemistry**, v. 19, n. 5, p. 400–412, 2015.

LI, Y.; PARK, S.Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15, 821-826. 2011.

LIMA et al. Propostas de ajuste no cálculo do payback de projetos de investimentos financiados **Custos e @gronegocio**, Pernambuco, v. 9, n. 4, p.163-180, Out./Dez 2013.

MARSON, C; REICHERT, G.A. **Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental)-Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul.. Outubro de 2017.

MATHERI, A. N. et al. Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 756–764, dez. 2017.

MALINOWSKY, C. **Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos da UFSC através de biodigestor anaeróbio.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2016

NEVES, V. L. V. **Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino.** 57f. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Faculdade de Tecnologia em Biocombustíveis) - Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2010.

ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Relatório Perspectivas Mundiais de População 2019: Destaques.** Divisão de Populações. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais. ONU. Junho de 2019.

PALHARES, J. C. P.; GEBLER, L. **Gestão Ambiental na Agropecuária.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA. v. 2, 490 p. Brasília, DF. 2014.

PAZ, Mariana Gutierrez Arteiro da. Water and sanitation services: views and experience. **Ambiente & Sociedade**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.229-234, jan-mar. 2015.

PHILIPPI, Luiz Sérgio. **Saneamento descentralizado: Instrumento para o desenvolvimento sustentável**. In: IX SILUBESA SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 9., 2000, Porto Seguro/Ba. **Anais...** Porto Seguro: ABES, 2000. p.1833-1841.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ª Edição. 2006.

PROBIOGAS **Tecnologias de Digestão Anaeróbia com Relevância para o Brasil: Substratos, Digestores e Uso De Biogás**. Coletânea de publicações do PROBIOGÁS - Série Aproveitamento Energético de Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das cidades. Brasil. 2015.

PROENÇA, L. C. **Utilização de Digestores Anaeróbios para o Tratamento de Resíduos Orgânicos Urbanos com Aproveitamento Energético do Biogás em Florianópolis, SC**. Tese de Conclusão de Curso. 2010.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2012. 79f.

RISTOFF, Dilvo. **A Universidade Brasileira Contemporânea: Tendências e Perspectivas**. In: MOROSINI, Marília (org.). **A Universidade no Brasil: conceitos e modelos**. Brasília: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira, 2006. Cap. 1, p. 37- 52.

ROCHA, C.M. **Proposta de Implantação de um Biodigestor Anaeróbio de Resíduos Alimentares**. Trabalho de Final de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

ROSENFELDT, Sebastian et al.. **Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de RSU com produção de biogás**. Brasília: Ministério das Cidades, 2016. 124 p.

SAMPAIO, S.R. **Avaliação de Fontes de Nitrogênio Suplementares da Digestão Anaeróbia de Resíduos Alimentares com Vistas a Produção de Biometano**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável. Universidade Federal do Espírito Santo, 2019.

SILVA, M. C. P. **Avaliação de lodo anaeróbio e dejetos bovinos como potenciais inóculos para partida de digestores anaeróbios de resíduos alimentares**. p. 98, 2014.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2017. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>>. Acesso em: 02 set. 2019.

SOTTI, Gustavo de. **Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário**. Tese de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2014.

TIWARY, A. E. et al. PERSPECTIVES ON ENVIRONMENTAL BURDEN MINIMISATION INITIATIVES FROM ANAEROBIC DIGESTION TECHNOLOGIES FOR COMMUNITY SCALE BIOMASS VALORISATION *et al.* Emerging perspectives on environmental burden minimisation initiatives from anaerobic digestion technologies for community scale biomass valorisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 883–901, 2015.

TRACY, John A. **Finanças-Descomplicando conceitos, soluções dinâmica, ideias inovadoras e dicas que realmente funcionam**. São Paulo: Campus, 2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR). **Biogás**. UFPR, 206. Disponível em: <<http://www.palotina.ufpr.br/portal/bioenergia/wp->

content/uploads/sites/5/2018/05/Apresenta%C3%A7ao_Biogas_Palotina-C%C3%B3pia.pdf> Acesso em: 04 dez. 2019.

VAGAS. **Busca de salários**. 2019. Disponível em: <<https://www.vagas.com.br/>>. Acesso em: 04 dez. 2019.

VAN HAANDEL, A. C. e LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente**. Epgraf: 1994.

VILELA, F.R. **Biometanização: estudo da influência do lodo e da serragem no tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU)**. Dissertação de Mestrado. São Carlos, 2015.

VISSER, A. The anaerobic treatment of sulfate containing wastewater. **Environmental Technology**. 145 p. 1995.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. DESA - UFMG. 3ª ed. 456 p. 2005.

WANG, P. *et al.* Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—A review. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 29–36, 2018.

ZANIN, Antonio; BAGATINI, Fabiano Marcos; PESSATTO, Camila Batista. Viabilidade econômico-financeira de implantação de biodigestor: uma alternativa para reduzir os impactos ambientais causados pela suinocultura. **Custos e @gronegocio**, Pernambuco, v. 6, n. 1, p.121-139, jan. 2010.

ZHANG, C; SU, H.; TAN, T. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid–liquid system. **Bioresour Technol** 145:10–6. 2013.

ZHANG, R.; EL-MASHAD, H.M.; HARTMAN, K.; WANG, F.; LIU, G.; CHOATE, C.; GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresour. Technol.** 98, 929–935. 2007.